

LA FORMA, LA ACÚSTICA Y EL REVESTIMIENTO DE MATERIALES EN
EL AUDITORIO LEÓN DE GREIFF

LAURA CAMILA MONTOYA PÁRRAGA

TUTORA:
MARÍA CAMILA CORONADO
COTUTORA:
ANDREA NIAMPIRA

LÍNEA PROYECTO: TEORÍA MÉTODOS Y PRÁCTICAS

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y ARTES
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA
BOGOTÁ D.C. DICIEMBRE DE 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inmensamente el apoyo de mi familia, a la Ingeniera de sonido Nicole Stefania Guzmán Quintero, la arquitecta María Camila Coronado, la arquitecta Andrea Niampira y al Ingeniero de sonido Carlos Peña por acompañarme en este proceso académico que me llevará a ser más integra profesionalmente.

DEDICATORIA

A Jerónimo Castro Montoya quien me inspira a nunca desistir

RESUMEN

Esta investigación estudia la relación entre la forma, la acústica y el revestimiento de materiales como cualidad básica e importante en un proyecto, esta investigación está orientada a responder: ¿Cómo se relaciona la forma, la acústica y el revestimiento de materiales en el auditorio León de Greiff? Se toma como estudio de caso este auditorio, porque ha sido objeto de diferentes estudios y cuenta con reconocimientos en la proyección de una forma que empezó a involucrar conceptos acústicos. Es por este motivo, que nace el interés por estudiar de qué manera se puede proceder para entender por qué y cómo se proyectó la forma geométrica y aprender acerca del comportamiento del sonido dentro de la sala del auditorio. La metodología se desarrolló a partir de un método teórico que soporta un método exploratorio analítico, para concluir que la composición unificada cuenta con características cualitativas y cuantitativas funcionales para el diseño de espacios con requerimientos acústicos.

PALABRAS CLAVE

León de Greiff, forma arquitectónica, geometría arquitectónica, acústica arquitectónica, composición

ABSTRACT

This research focuses on the studies between shape with the acoustic characteristics and the coating of materials as a basic and important quality in a project. Therefore, this research is intended to answer: how is the shape, acoustics and the coating of materials related in the León de Greiff auditorium? This auditorium is used as a case study because it has been recognized for how its design incorporates acoustic concepts. This research intend to help understand why and how the use of a geometric shape in the planning and design can influence the behavior of sound within the auditorium. The application and design was developed from a theoretical method to focus on qualitative and quantitative characteristics for the design of spaces that require specific acoustic characteristics.

KEYWORDS

León de Greiff, architecture shape, architecture geometry, architectural acoustics, composition

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
AUDITORIO LEÓN DE GREIFF	6
.....	7
MARCO TEÓRICO	8
1. LA FORMA ARQUITECTÓNICA	8
2. LA ACÚSTICA Y LA TRANSMISIÓN DEL SONIDO	10
2.1 EL SONIDO.....	10
3. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA	12
3.1 AISLAMIENTO ACÚSTICO	12
3.2 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO	13
A. DISTRIBUCIÓN SONORA (SPL)	15
B. TIEMPO DE REVERBERACIÓN (RT)	16
C. ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (STI).....	17
D. PÉRDIDA DE LA ARTICULACIÓN DE LAS CONSONANTES (%ALCONS).....	18
E. CLARIDAD DE LA VOZ (C50).....	19
F. CLARIDAD MUSICAL (C80).....	20
G. AURALIZACIÓN	20
4. LA GEOMETRÍA ACÚSTICA	21
4.1 EL COMPORTAMIENTO GEOMÉTRICO.....	21
A. REFLEXIÓN	23
B. ABSORCIÓN	24
C. DIFUSIÓN.....	24
4.2 EL COMPORTAMIENTO DEL SONIDO EN LA FORMA GEOMÉTRICA	25
4.3 EL COMPORTAMIENTO VISUAL	26
5. LA MATERIALIDAD	28
MÉTODO EXPLORATORIO ANALÍTICO	31
6. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS PARA ENTENDER LA GEOMETRÍA	31
6.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL AUDITORIO	31
6.2 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL AUDITORIO	35
6.3 ENTENDIENDO EL COMPORTAMIENTO DE LOS RAYOS SONOROS EN LA GEOMETRÍA	41
6.4 ENTENDIENDO EL COMPORTAMIENTO VISUAL	47

6.5	DESCRIPCIÓN DE LA MATERIALIDAD DEL AUDITORIO	53
6.6	ENTENDIENDO EL COMPORTAMIENTO DE LOS RAYOS SONOROS CON REVESTIMIENTO DE MATERIALES	62
6.7	CONCLUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.....	70
7.	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS PARA OTORGAR CRITERIOS ACÚSTICOS A LA GEOMETRÍA.....	73
7.1	ANÁLISIS DE CRITERIOS SIN REVESTIMIENTO DE MATERIALES.....	75
A.	TIEMPO DE REVERBERACIÓN	76
B.	ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (STI).....	77
C.	CLARIDAD MUSICAL C80	78
D.	CLARIDAD DE LA VOZ C50	79
E.	PERDIDA DE LA ARTICULACIÓN DE LAS CONSONANTES %ALCONS	80
F.	DISTRIBUCIÓN SONORA (SPL)	81
G.	AURALIZACIÓN	82
7.2	ANÁLISIS DE CRITERIOS CON REVESTIMIENTO DE MATERIALES.....	83
A.	TIEMPO DE REVERBERACIÓN	87
B.	ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (STI).....	88
C.	CLARIDAD MUSICAL C80	89
D.	CLARIDAD DE LA VOZ C50	90
E.	PERDIDA DE LA ARTICULACIÓN DE LAS CONSONANTES %ALCONS	91
F.	DISTRIBUCIÓN SONORA (SPL)	92
G.	AURALIZACIÓN	93
7.3	CONCLUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS.....	94
8.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	96
9.	CONCLUSIÓN	102
	COMPOSICIÓN UNIFICADA	102
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	104
11.	ANEXOS	106
	ANEXOS 1 PLANIMETRÍA DEL AUDITORIO LEÓN DE GREIFF.....	106
	ANEXO 2 FOTOGRAFÍAS DEL AUDITORIO LEÓN DE GREIFF.....	109
	ANEXO 3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES QUE CARACTERIZAN EL SONIDO	111
	EL RUIDO	111
	ANEXO 4 IMAGEN GENERAL DEL SOFTWARE EASE VERSIÓN 4.3.....	115

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Planta arquitectónica general.....	6
Figura 2 Fachada suroccidental	7
Figura 3 Banda de frecuencia de instrumentos musicales y de la voz.....	11
Figura 4 Transmisión de la energía sonora en un edificio	13
Figura 5 Ejemplo de penetración de diferentes tipos de ruidos en un recinto	14
Figura 6 Planos inclinados en el techo.....	22
Figura 7 Quiebres en muros laterales.....	22
Figura 8 Reflexiones de la onda sonora	23
Figura 9 Absorción de la onda sonora	24
Figura 10 Difusión de la onda sonora	24
Figura 11 Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones de un receptor...	25
Figura 12 Líneas visuales.....	26
Figura 13 Procedimiento gráfico para evitar la pantalla acústica	26
Figura 14 Interpretación de silletería intercalada.....	27
Figura 15 Diagrama de los materiales absorbentes acústicos	30
Figura 16 Zonificación y área total	31
Figura 17 Capacidad de personas	32
Figura 18 Dimensiones	32
Figura 19 Volumen de la sala del auditorio	33
Figura 20 Descripción de la sala	34
Figura 21 Niveles en planta	35
Figura 22 Niveles en corte	36
Figura 23 Escenario y foso	36
Figura 24 Zona baja	37
Figura 25 Zona media	37
Figura 26 Zona alta	38
Figura 27 Cerramiento perimetral zona baja	38
Figura 28 Cerramiento perimetral.....	39
Figura 29 Cerramiento perimetral zona media	39
Figura 30 Cerramiento perimetral zona alta	40
Figura 31 Cerramiento de la pieza	40
Figura 32 Trazado de rayos sonoros costado derecho zona baja	41
Figura 33 Trazado de rayos sonoros del costado derecho en la zona de atrás.....	42
Figura 34 Trazado de rayos sonoros costado central zona de atrás	43
Figura 35 Trazado de rayos sonoros costado izquierdo zona de atrás.....	43
Figura 36 Trazado de rayos sonoros costado izquierdo zona de atrás	44
Figura 37 Trazado de rayos sonoros de la sala completa.....	45
Figura 38 Trazado de rayos sonoros en corte	46
Figura 39 Visualizaciones en planta	47
Figura 40 Visualizaciones costado derecho.....	48
Figura 41 Visualizaciones costado izquierdo	49
Figura 42 Visuales centrales	49

Figura 43 Posicionamiento intercalado de la silletería	50
Figura 44 Posicionamiento una detrás de otra de la silletería.....	50
Figura 45 Entendiendo las visuales en la zona baja.....	51
Figura 46 Entendiendo las visuales en la zona media.....	52
Figura 47 Entendiendo las visuales en la zona alta.....	52
Figura 48 Material estructural portante.....	53
Figura 49 Materialidad escenario y foso.....	54
Figura 50 Escenario, Auditorio León de Greiff	54
Figura 51 Materialidad zona de audiencia	55
Figura 52 Revestimiento de piso para zona de audiencia, Auditorio León de Greiff.....	55
Figura 53 Asientos para el aforo	56
Figura 54 Silletería zona de audiencia, Auditorio León de Greiff.....	56
Figura 55 Accesos a la sala.....	57
Figura 56 Accesos, Auditorio León de Greiff	57
Figura 57 Revestimiento en paneles de madera.....	58
Figura 58 Revestimiento muros de escenario, Auditorio León de Greiff.....	58
Figura 59 Revestimiento material zona media.....	59
Figura 60 Revestimiento de muros perimetrales, Auditorio León de Greiff	59
Figura 61 Revestimiento de material zona alta.....	60
Figura 62 Revestimiento de muros perimetrales, Auditorio León de Greiff	60
Figura 63 Revestimiento de cubierta	61
Figura 64 Revestimiento de la cubierta, Auditorio León de Greiff	61
Figura 65 Trazado de rayos sonoros costado derecho zona baja	62
Figura 66 Trazado de rayos sonoros costado derecho zona baja media	63
Figura 67 Trazado de rayos sonoros costado derecho zona media alta	64
Figura 68 Trazado de rayos sonoros costado derecho zona alta.....	65
Figura 69 Trazado de rayos sonoros costado de atrás.....	65
Figura 70 Trazado de rayos sonoros costado izquierdo zona alta	66
Figura 71 Trazado de rayos sonoros costado izquierdo.....	67
Figura 72 Trazado de rayos sonoros de la sala completa con revestimiento de material	68
Figura 73 Trazado de rayos sonoros en corte de la sala con revestimiento de material	69
Figura 74 Quiebres perimetrales para la sala.....	70
Figura 75 Geometría en corte	71
Figura 76 Geometría con revestimiento de materiales	72
Figura 77 Levantamiento del costado derecho	74
Figura 78 Levantamiento de la sala completa.....	74
Figura 79 Levantamiento costado izquierdo.....	74
Figura 80 Gráfico de absorción del concreto por frecuencia.....	75
Figura 81 Tiempo de reverberación calculados por el software EASE 4.3	76
Figura 82 Índice de transmisión de la palabra (STI) calculados por el software EASE 4.3.....	77
Figura 83 Claridad musical C80 calculados por el software EASE 4.3	78
Figura 84 Claridad de la voz C50 calculados por el software EASE 4.3	79
Figura 85 Articulación de las consonantes calculados por el software EASE 4.3	80

Figura 86 Distribución sonora SPL calculados por el software EASE 4.3.....	81
Figura 87 Levantamiento cara frontal.....	83
Figura 88 Levantamiento costado derecho.....	84
Figura 89 Levantamiento visual desde la cubierta.....	84
Figura 90 Coeficientes de absorción del revestimiento actual de materiales de la sala.....	86
Figura 91 Tiempo de reverberación calculados por el software EASE 4.3.....	87
Figura 92 Índice de transmisión de la palabra calculados por el software EASE 4.3.....	88
Figura 93 Claridad musical C80 calculados por el software EASE 4.3.....	89
Figura 94 Claridad de la voz C50 calculados por el software EASE 4.3.....	90
Figura 95 Articulación de las consonantes calculados por el software EASE 4.3.....	91
Figura 96 Distribución sonora (SPL) calculados por el software EASE 4.3.....	92
Figura 97 Corte y planta de la forma geométrica.....	97
Figura 98 Afectaciones por zonas del comportamiento del sonido sin revestimiento de materiales.....	98
Figura 99 Geometría + revestimiento de materiales.....	98
Figura 100 Comportamiento del sonido en la geometría por zona con revestimiento de materiales.....	99
Figura 101 Relación entre forma y acústica.....	100
Figura 102 Relación entre forma, acústica y revestimiento de materiales.....	100
Figura 103 Relación completa.....	101
Figura 104 Planta arquitectónica (incluye la sala).....	106
Figura 105 Fachada norte.....	107
Figura 106 Fachada occidental.....	107
Figura 107 Fachada oriental.....	108
Figura 108 Fachada sur.....	108
Figura 109 Auditorio León de Greiff.....	109
Figura 110 Auditorio León de Greiff.....	109
Figura 111 Auditorio León de Greiff.....	110
Figura 112 Auditorio León de Greiff.....	110
Figura 113 El ruido.....	111
Figura 114 Frecuencia de una onda sonora.....	112
Figura 115 Niveles audibles en función de la frecuencia junto con las zonas correspondientes a la música y a la palabra.....	113
Figura 116 Periodo (segundos).....	114
Figura 117 Relación entre la longitud de onda y la frecuencia del sonido en el aire a 20°C y presión atmosférica normal.....	114
Figura 118 Software EASE 4.3.....	114

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 Márgenes de valores recomendados de RT_{mid} en función del tipo de sala (recintos ocupados) ..	17
Tabla 2 Coeficientes de absorción del concreto en el rango de frecuencias 100 a 10.000Hz.....	75
Tabla 3 Coeficientes de absorción del revestimiento de materiales actuales de la sala.. Error! Marcador no definido.	
Tabla 4 Comparación de resultados acústicos	94

INTRODUCCIÓN

Los sentidos del ser humano tienen un poder magnífico en la arquitectura, la vista, el oído, el tacto, el olfato e incluso el gusto. Estos, son los primeros receptores del cuerpo humano que permiten la percepción de diferentes sensaciones cuando una persona está haciendo parte de la arquitectura. En esta investigación, el sentido del oído y la vista, son el punto de partida para estudiar la proyección de la forma y analizar el comportamiento del sonido en un espacio. Es por esto, que esta investigación se centra en el estudio de la composición unificada entre el comportamiento de la geometría y la transformación del sonido en el auditorio León de Greiff en la ciudad de Bogotá.

“El valor de la arquitectura es el espacio que crea: el valor del sonido en la arquitectura es el espacio que crea. El espacio se manifiesta no solo física y visualmente, sino también por medio del sonido. La presencia del espacio es notoria a través del sonido, y este es uno de los factores que le dan valor. Se puede decir que uno de los valores del espacio es el sonido que crea.” (Rodríguez, 2013, pág. 158)

El eje fundamental que guía esta investigación se basa en dos conceptos que se nombrarán de principio a fin, la agrupación entre la forma geométrica y el comportamiento del sonido.

El concepto de la forma geométrica se estudia de acuerdo a los intereses de cada profesional. Dentro de esta investigación, el concepto de la forma geométrica se tuvo en cuenta a partir de la teoría de Mauricio Gaviria Restrepo y Alain Borie, Pierre Micheloni y Pierre Pinon. que aportaron al desarrollo de la investigación y permitieron tomar una decisión en el método teórico para comprender la forma en la acústica arquitectónica. Ya que no existen procesos únicos y exactos a la hora de estudiar la arquitectura.

La forma geométrica además de ser la apariencia, es el sentido que articula y organiza los elementos para expresar su proyección. La geometría en la acústica arquitectónica representa una toma de decisiones que evidencia las cualidades de las proporciones que visualmente se ven estéticas, pero a profundidad están expresando características cualitativas y cuantitativas funcionalmente acústicas para la sala del auditorio León de Greiff.

La acústica arquitectónica se extiende un poco más, ya que, para entender su fin, se debe tener en cuenta, en primer lugar, la percepción sonora en donde se aclara la diferencia entre ruido y sonido. Es importante tener esto claro, ya que la acústica es el estudio de la propagación adecuada y funcional de los sonidos. Como la acústica abarca diferentes ramas, en esta investigación se va a estudiar la acústica arquitectónica de salas, es decir el estudio de la propagación adecuada y funcional de los sonidos en cualquier espacio habitable.

En esta investigación el estudio de la acústica arquitectónica se realizará a un espacio cerrado y específicamente en la arquitectura de una sala polivalente, ya que es un espacio en donde se pueden realizar actividades de música y de palabra. Dentro del campo de la acústica arquitectónica existen parámetros que permiten dar una caracterización completa de cualquier espacio o recinto. En este

caso, la proyección arquitectónica de salas multifuncionales estudiará los parámetros físicos o criterios de evaluación que permiten evidenciar el comportamiento de la energía sonora al interior de esta.

La forma geométrica y la acústica arquitectónica son los dos conceptos que actúan en la agrupación de la composición unificada, estos conceptos requieren de conceptualizaciones consistentes y coherentes para el desarrollo analítico de un estudio de caso.

El arquitecto que diseña una sala de conciertos no tiene un entrenamiento en acústica y requiere generalmente del apoyo de un consultor en este campo, pero es posible y necesario comprender la lógica de la acústica arquitectónica para que desde el proyecto podamos controlar autónomamente la forma en beneficio del sonido. (Restrepo, El espacio de la música, 2011, pág. 27)

De acuerdo a lo anterior, se toma el auditorio leon de greiff como estudio de caso para relacionar la composición unificada entre la forma geométrica y la acústica arquitectónica, con el fin de comprender la importancia que debe tener dentro de la arquitectura. Por esta razón, esta investigación plantea la siguiente pregunta, ¿Cómo se relaciona la forma, la acústica y el revestimiento de materiales en el auditorio León de Greiff?

En la proyección arquitectónica actual del auditorio, dominan unos componentes que permiten interpretar su resultado de diferentes maneras. Para esta investigación es fundamental que el aporte vaya ligado a la utilidad e importancia, de los dos conceptos mencionados anteriormente que involucran los sentidos auditivos y visuales del ser humano dentro de la arquitectura.

Así mismo, esta investigación parte del interés por estudiar la forma proyectada y el comportamiento del sonido en un espacio delimitado. Aporta por medio de un análisis, a la importancia que se le debe dar al diseño acústico en la arquitectura y una herramienta exploratoria que permite entender el porqué de la forma de la sala del auditorio.

Dicho lo anterior, el objetivo principal de esta investigación es, Determinar cómo se relaciona la forma, la acústica y el revestimiento de materiales en el auditorio León de Greiff, definiendo los conceptos de la forma geométrica y acústica arquitectónica para soportar el comportamiento de la geometría y del sonido. Identificando los parámetros y componentes para analizar la geometría y simular y estimar el comportamiento del sonido con el fin de representar de qué manera el comportamiento de estos se unifican en la composición de la sala del auditorio León de Greiff.

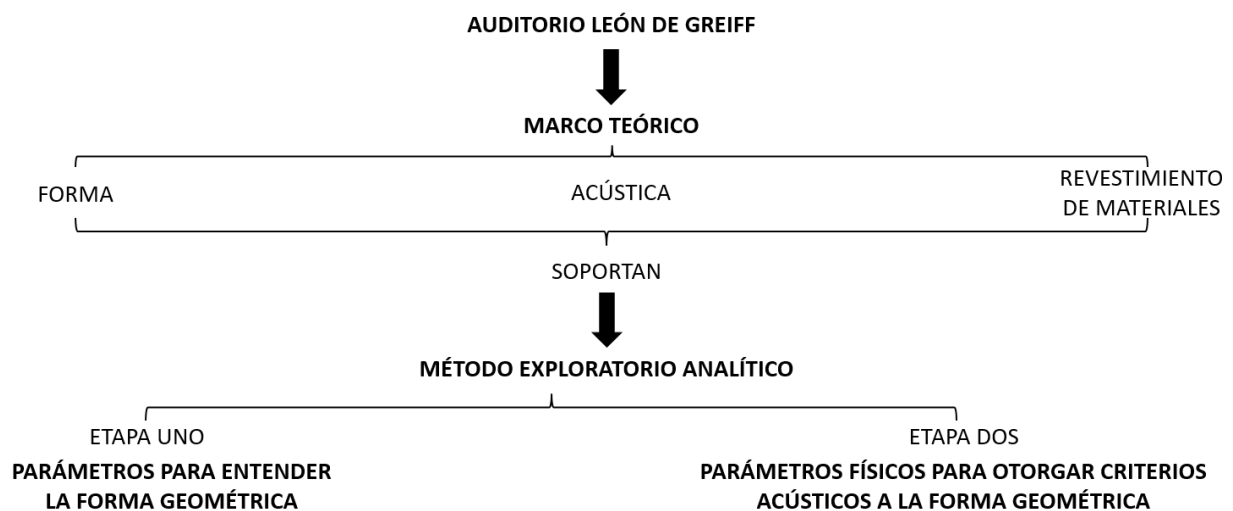
METODOLOGÍA

Se considera pertinente desarrollar la metodología a partir de un método teórico que se involucra con textos e hipótesis en los conceptos de la composición unificada, la forma geométrica y la acústica arquitectónica para soportar el método exploratorio analítico. El desarrollo de la metodología empezó tomando como estudio de caso el auditorio León de Greiff diseñado por la arquitecta Eugenia Mantilla de Cardoso en el año 1973 ya que hace parte de una de las proyecciones para la escena más representativas de Bogotá y también, porque cuenta con diferentes reconocimientos en donde se resalta su proyección y la innovación de la técnica al involucrar la acústica en la arquitectura de la época en Bogotá.

Las siguientes citas se anexan porque fueron algunas de las publicaciones encontradas de la Universidad Nacional de Colombia y el periódico EL TIEMPO en donde se mencionaron los reconocimientos con los que cuenta el auditorio León de Greiff. “*Gestora del auditorio León de Greiff –María Eugenia Mantilla de Cardozo*” (saber, unradio.unal.edu.co, 2016) “*Gestora del auditorio León de Greiff –María Eugenia Mantilla de Cardozo 2*” (saber, unradio.unal.edu.co, 2016). “*Eugenia Mantilla de Cardoso, la arquitecta del león de Greiff*” (Barrera, 2017) “*El León de Greiff cumple cuatro décadas de historias*” (Barón, 2013)

Este documento se distribuye en tres capítulos, método teórico, método exploratorio analítico y discusión de resultados. Dentro del método teórico, se desarrolló todo el contenido para conceptualizar el auditorio León de Greiff, la composición unificada, la forma arquitectónica, la acústica, el ruido y el sonido, la acústica arquitectónica, la geometría acústica y la materialidad. En el segundo capítulo se realizó el método exploratorio analítico en donde se muestra todo el proceso de los parámetros para entender la geometría y los parámetros físicos para otorgar criterios acústicos a la geometría. En el tercer capítulo se unifican las conclusiones de los resultados mostrando una discusión y las conclusiones finales para esta investigación.

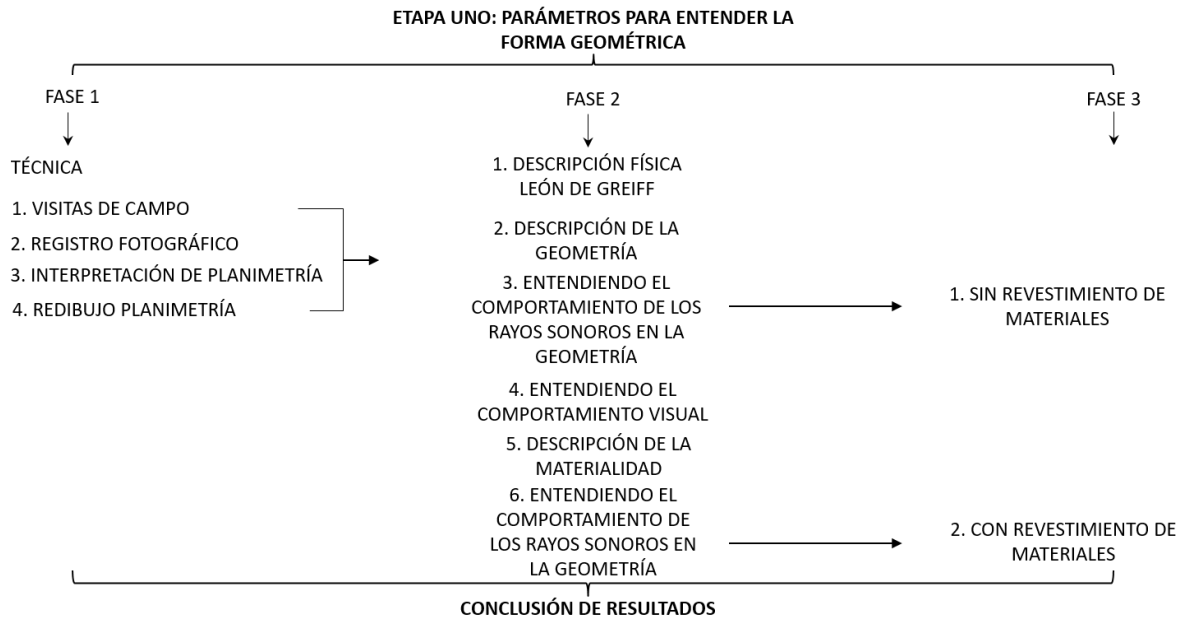
El método exploratorio analítico se divide en dos etapas, la primera se centra en la identificación de los parámetros para entender la forma geométrica, y la segunda se basa en el análisis de los parámetros físicos para otorgar criterios acústicos a la forma geométrica.



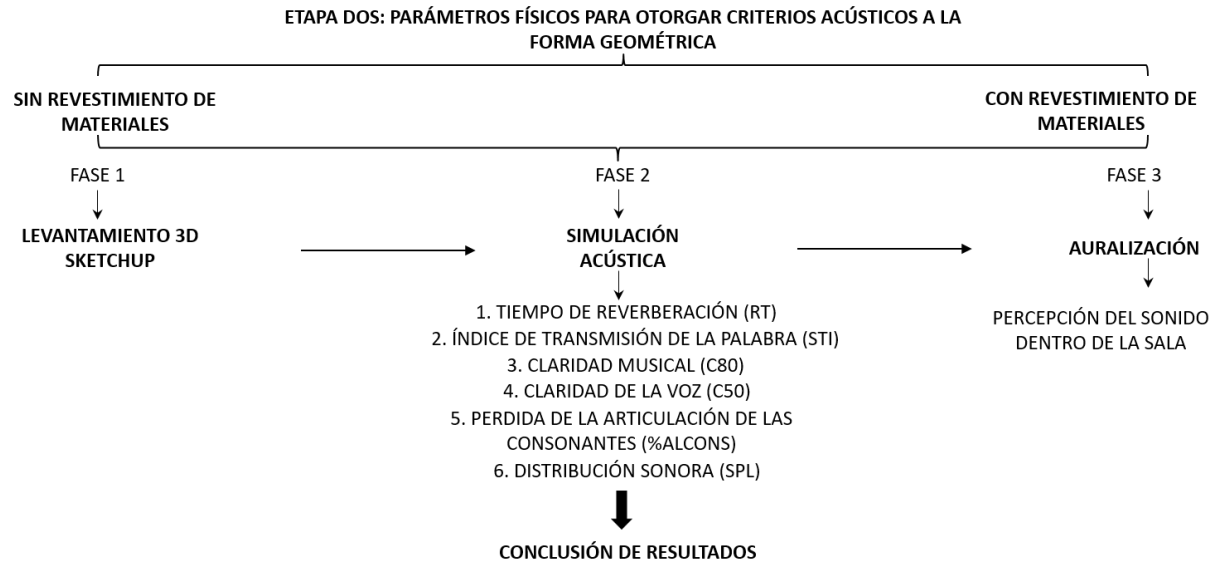
La primera etapa se convirtió en un proceso descriptivo analítico para el auditorio en tres fases:

La primera fase fue la técnica en donde se realizaron unas visitas de campo, un registro fotográfico, la interpretación de la planimetría y el constante redibujo de estos para conocer físicamente el auditorio. Esto permitió que en la segunda fase se desarrollaran cinco puntos en donde se describió y se entendió el auditorio en diferentes aspectos.

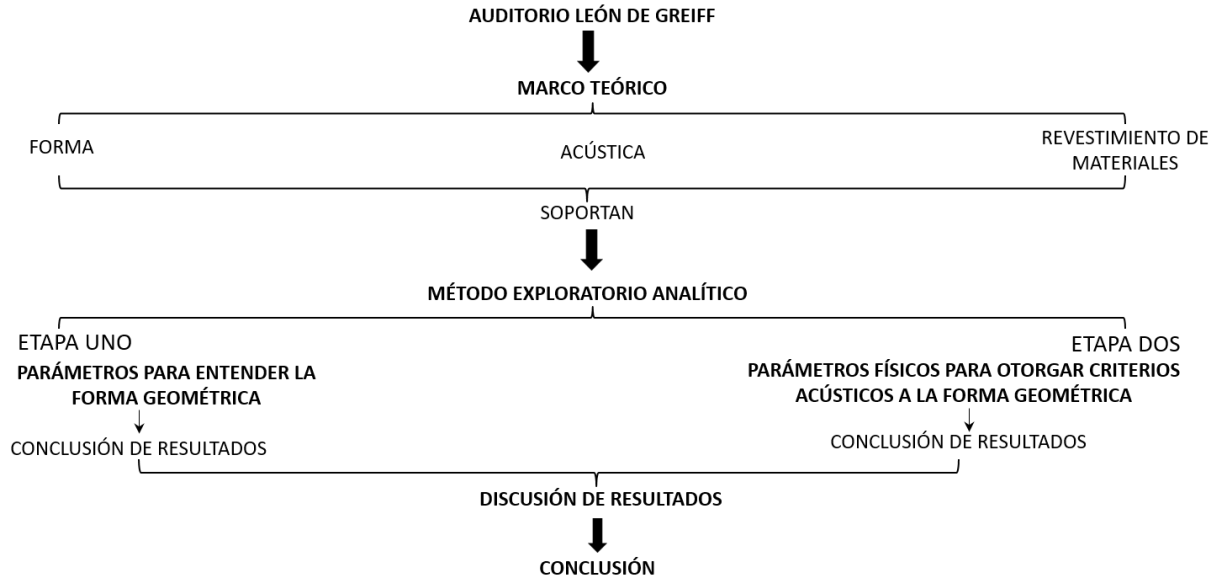
Para finalizar esta etapa, la tercera fase se desarrolló en dos aspectos teniendo en cuenta un solo punto de la fase número dos. Esta etapa generó un proceso para comprender la forma de la sala del Auditorio León de Greiff.



Conjuntamente se desarrolló la segunda etapa, en donde se realizó un análisis de los parámetros físicos para otorgar criterios acústicos a la forma geométrica ya estudiada. Este análisis se desarrolló a partir de dos fases, una sin revestimiento de materiales y otra con revestimiento de materiales. Cada fase se dividió en tres partes, en la primera se realizó un levantamiento 3D del volumen de la sala con y sin revestimiento de materiales, en el programa SketchUp versión PRO2016, el levantamiento fue necesario para desarrollar una simulación acústica con el software EASE versión 4.3 en donde se analizaron los criterios acústicos como distribución sonora (SPL), tiempo de reverberación (RT), índice de transmisión de la palabra (STI), pérdida de la articulación de las consonantes (%ALCONS), claridad de la voz (C50) y claridad musical (C80) para la sala sin y con revestimiento de materiales y por último, en la tercera parte se realizó una auralización que permitió simular la percepción del sonido con y sin revestimiento de materiales dentro de la sala.



Finalmente, en el tercer capítulo, se realiza la discusión de resultados de los análisis hechos y se concluye demostrando la composición unificada entre la geometría y el comportamiento del sonido en el Auditorio León de Greiff.



AUDITORIO LEÓN DE GREIFF

El Auditorio León de Greiff fue diseñado por la Arquitecta Eugenia Mantilla de Cardozo para la Universidad Nacional de Bogotá, ubicada en la localidad de Teusaquillo al noroccidente de la ciudad y conocida como ciudad universitaria o ciudad blanca por tener un crecimiento arquitectónico de edificios patrimoniales y culturales. Este proyecto se inauguró en el año 1973, en el año 1974 la Arquitecta diseñadora ganó el premio Nacional de Arquitectura, que es otorgado por la Sociedad Colombiana de Arquitectos, en el encuentro de la Bienal Colombiana de Arquitectura y Urbanismo. El auditorio fue declarado monumento Nacional en el año 1996.

Este auditorio se destaca en la ciudad de Bogotá por ser un reconocido escenario para la orquesta filarmónica de Bogotá y en general para conciertos de música, obras de teatro, espectáculos de danza, conferencias, congresos, simposios y cátedras. Además de esto, su reconocimiento se da por poseer características acústicas y arquitectónicas representativas, sin embargo, los estudios en los que ha participado son muy reservados. Es por esto que se toma como estudio de caso para esta investigación. Las figuras número 1 y 2 son la representación de las plantas y fachadas arquitectónicas actuales del auditorio, esta planimetría fue facilitada por solicitud a la Universidad Nacional de Colombia. Ver en anexo 1 la planimetría completa y en anexo 2 las fotografías completas.

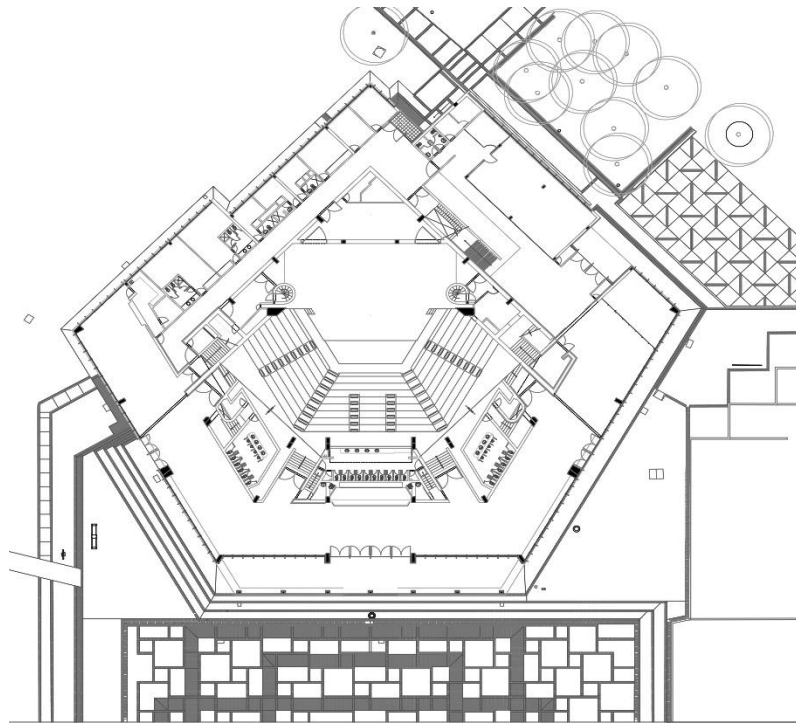


Figura 1 Planta arquitectónica general

Fuente: (Colombia)

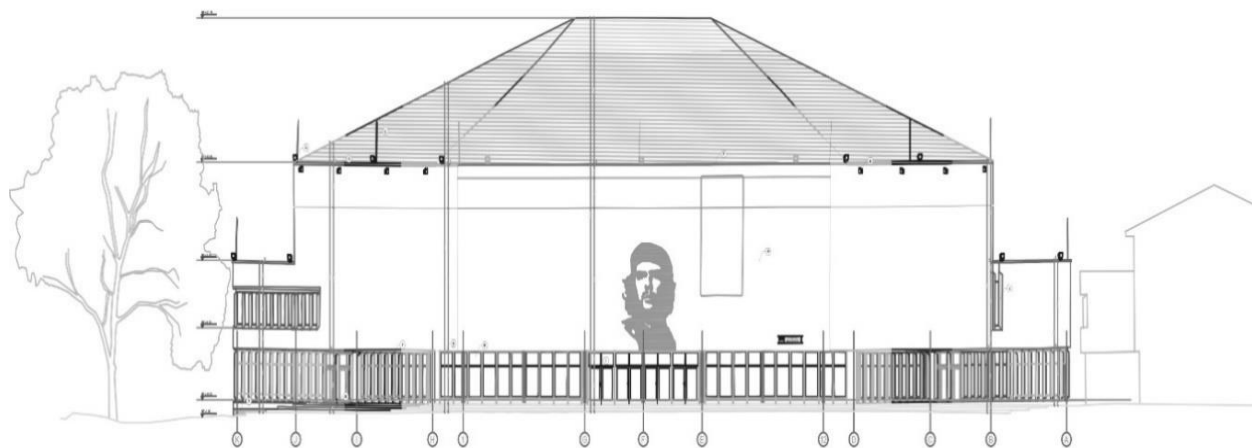


Figura 2 Fachada suroccidental

Fuente: (Colombia)

MARCO TEÓRICO

El método teórico para esta investigación empieza a desarrollarse con el concepto de la forma arquitectónica para conceptualizar como se dirige su concepto y por último se encuentra la acústica y la acústica arquitectónica, que ya trata el tema específico del sonido dentro de un espacio. La acústica arquitectónica se divide en tres partes, se conceptualiza solo el aislamiento y se profundiza en el acondicionamiento. Se incluyen los criterios acústicos, SPL, RT, STI, %ALCONS, C50, C80 que se van a tener en cuenta en el método exploratorio analítico y se añade el concepto de la auralización. Una vez conceptualizada la parte más técnica de la acústica arquitectónica, entramos en la geometría acústica, en donde se profundiza en la forma a partir del comportamiento del sonido. La geometría acústica se divide en el comportamiento geométrico, en el comportamiento del sonido en la forma geométrica y en el comportamiento visual. Finalizando con la materialidad.

1. LA FORMA ARQUITECTÓNICA

El concepto de la forma arquitectónica trae consigo diferentes teorías que permiten ser estudiadas de acuerdo a los intereses de cada profesional. Dentro de esta investigación, el concepto de la forma arquitectónica se tuvo en cuenta a partir de teorías existentes (Alain Borie, 2008), (Restrepo, El espacio de la música, 2011), que aportaron al desarrollo de la investigación y permitieron tomar una decisión en el método teórico para comprender la forma geométrica en la acústica arquitectónica. Ya que la forma geométrica además de ser la apariencia, también es el sentido que articula y organiza los elementos para expresar su significado.

La tesis del arquitecto Mauricio Gaviria Restrepo “el espacio de la música” (Restrepo, El espacio de la música , 2011) dentro de su investigación, busca relacionar la forma y el sonido a partir de un análisis de la estructura formal arquitectónica en las salas de concierto. El aporte de su investigación se centra en las salas de concierto porque *“no existe un único espacio adecuado simultáneamente para la acústica de la música y de la palabra; las partes o elementos, así como las relaciones que conformar la estructura de la forma son diferentes para cada uno de ellos”*. (Restrepo, El espacio de la música , 2011, pág. 11) . De acuerdo a esto, dentro de esta investigación, la estructura formal de la sala de conciertos se estudia desde el espacio interno y no desde su aspecto externo, expresado así, *“poner en sintonía la vida con la forma”*. Explicado de la siguiente manera. *“el sonido de la música genera y moldea el espacio interior que lo contiene y protege para la experiencia humana, pero también puede entenderse dicho espacio en tanto que estructura formal compuesta por partes y relaciones”*. (Restrepo, El espacio de la música , 2011, pág. 12).

Simultáneamente (Restrepo, El espacio de la música , 2011) cita diferentes conceptos que hacen referencia a la forma, porque a través del tiempo, se han planteado hipótesis con diversos argumentos. Es por esto que aclara que, en su investigación, *“cuando se hace referencia a la forma no se hace referencia a la imagen o a la figura, se habla de aquella estructura invisible compuesta de partes o elementos y combinaciones o relaciones. La forma es una estructura que no se aprecia*

directamente y a la cual se debe llegar a través de un proceso puramente analítico". (Restrepo, El espacio de la música , 2011, pág. 13). Una vez dirigida su investigación en la estructura formal, especifica que su estudio no se centra en un proyecto arquitectónico o en un solo arquitecto, sino en la entidad espacial que a través del tiempo han presentado las proyecciones arquitectónicas dedicadas al arte musical. Estudiar la entidad espacial de varias proyecciones arquitectónicas, permitió dentro de su investigación establecer una matriz que presentó las operaciones formales para analizar e identificar los elementos que han permanecido, los que han cambiado, los que se transformado y los que ya no se usan en los espacios para la música.

(Restrepo, El espacio de la música, 2011), concluyó que los espacios para la música y para la palabra deben cumplir características arquitectónicas y acústicas diferentes, y a partir de esto, especificó la estructura formal de las proyecciones y como esta se relaciona con el sonido. *"El sonido es sustancia sin forma que puede dar forma, dirigir y alterar el espacio y al igual que la luz es un material por excelencia de la arquitectura, frecuentemente olvidado en el trabajo del arquitecto"*. (Restrepo, El espacio de la música , 2011, pág. 196).

Esta tesis aportó de dos maneras esta investigación, una, tomándola como método teórico para comprender el tema escogido y el otro, para desarrollar una investigación que estudie experimentalmente como el sonido genera la forma y como la forma aporta para que el sonido sea adecuado dentro de un espacio.

Teniendo en cuenta que no existen procesos únicos y exactos a la hora de estudiar la arquitectura, el concepto de la forma arquitectónica dentro de esta investigación se lleva a cabo a partir de la forma geométrica porque, *"La geometría no representa solo una elección cultural para el arquitecto: es también, desde el principio, una elección técnica que permite resolver lo que se podría llamar la "ecuación espacial" dada al comienzo del proyecto.* (Alain Borie, 2008, pág. 16)

La geometría en la acústica arquitectónica es un orden lógico de elementos que permite comprender la representación de la forma. Se dispone para construir un espacio que cuente con un lenguaje que relacione los espacios internos y las proporciones de todos los elementos que componen el espacio, donde su proyección puede aprobarse o contradecirse según los requerimientos que caracterizaran acústicamente a el espacio.

Dentro de esta investigación, la forma geométrica usa procesos de composición proporcional y espacial para comprender la acústica arquitectónica, sin embargo, más allá de eso, quiere establecer la relación de las partes que conforman un todo, evidenciando las cualidades de las proporciones esenciales que visualmente se ven estéticas, pero a profundidad están expresando características cualitativas y cuantitativas funcionalmente para el espacio.

2. LA ACÚSTICA Y LA TRANSMISIÓN DEL SONIDO

La acústica, *“es la rama de la física que trabaja con la producción, control, transmisión, recepción y efectos del sonido”* (Francis D.K.Ching, 2015) Trayendo consigo un ámbito multidisciplinario, pues el estudio de la acústica abarca diferentes ramas, entre esas, la acústica arquitectónica, en donde se estudian los fenómenos y características que se producen de un sonido para fundamentar el comportamiento que este debe tener en el campo que se vaya a aplicar.

La acústica surge principalmente para el estudio de los sonidos y los ruidos producidos y transmitidos en el ambiente, lo que permite hacer una relación con el arte más antiguo que produce sonidos, la música. Lo que puede ser confuso para muchos, ya que su primera definición se fundamenta en la expresión de melodías que el ser humano puede generar con el uso de instrumentos. Sin embargo, al realizar un profundo estudio de la música, encontramos que este arte determina el estudio de una sonoridad; se podría decir que la música estudia estructuralmente la composición de los sonidos que los instrumentos generan. Hay que tener en cuenta la percepción sonora del oído humano y su propagación en espacios abiertos y cerrados. Esta opinión puede quedar más clara, si se estudia la acústica musical, encargada del comportamiento de los sonidos y los instrumentos musicales.

2.1 EL SONIDO

“El sonido es efímero y se desvanece poco después de que se produce, está presente en el espacio vacío solo durante unos cuantos segundos mientras dure su eco o reverberación, pero antes nos envuelve al igual que el espacio.” (Restrepo, El espacio de la música , 2011, pág. 25)

El sonido, es una vibración que genera energía producida por una fuente de cualquier tipo que se propaga a través de un medio, el cual puede ser sólido, líquido o gaseoso. En el campo de la acústica arquitectónica el medio en que se analiza es el aire. *“El sonido es la sensación estimulada por energía mecánica radiante transmitida como ondas de presión longitudinales a través del aire u otro medio elástico. Una onda se propaga desde la fuente hacia el exterior de una forma esférica hasta encontrar un obstáculo en su recorrido”.* (Binggeli, 2011, pág. 267). Este sonido es percibido por un transductor de señales de entrada para ser interpretado. En el ser humano este receptor es el oído, que gracias a su sistema interno permite que las señales análogas reales de sonidos puedan ser analizadas por el cerebro para identificar la proveniencia de este sonido capturado. *“Definimos el sonido como el resultado de una vibración mecánica, transmitida por el desplazamiento de las moléculas de aire, que al incidir en nuestros órganos auditivos producen en el cerebro una sensación especial.”* (Alanís, 2012, pág. 11)

Esto quiere decir que una fuente puede generar señales que se convierten en energía sonora la cual se propaga en un medio. Aunque en primera instancia se nombre el sonido a partir de conceptos en el campo musical, no hay que olvidar que existen diferentes fuentes generadoras de sonidos y cada uno tiene un comportamiento de acuerdo a los rangos frecuenciales.

Estos, se dan a partir del rango audible de 20Hz a 20.000 Hz con el que cuenta el ser humano. Las frecuencias de 20Hz son frecuencias que están por debajo del espectro audible del oído humano y las frecuencias de 20.000 Hz son aquellas que superan el espectro audible.

En la figura número 3 se muestra el rango de frecuencia donde se producen los sonidos de algunos instrumentos musicales incluyendo la voz humana. En la figura se nota que la voz e instrumentos de viento en madera, viento en metal, instrumentos de cuerda y percusión tienen un rango audible en unas frecuencias específicas y el único instrumento que presenta una permanencia en todos los rangos audibles de frecuencia son los teclados.

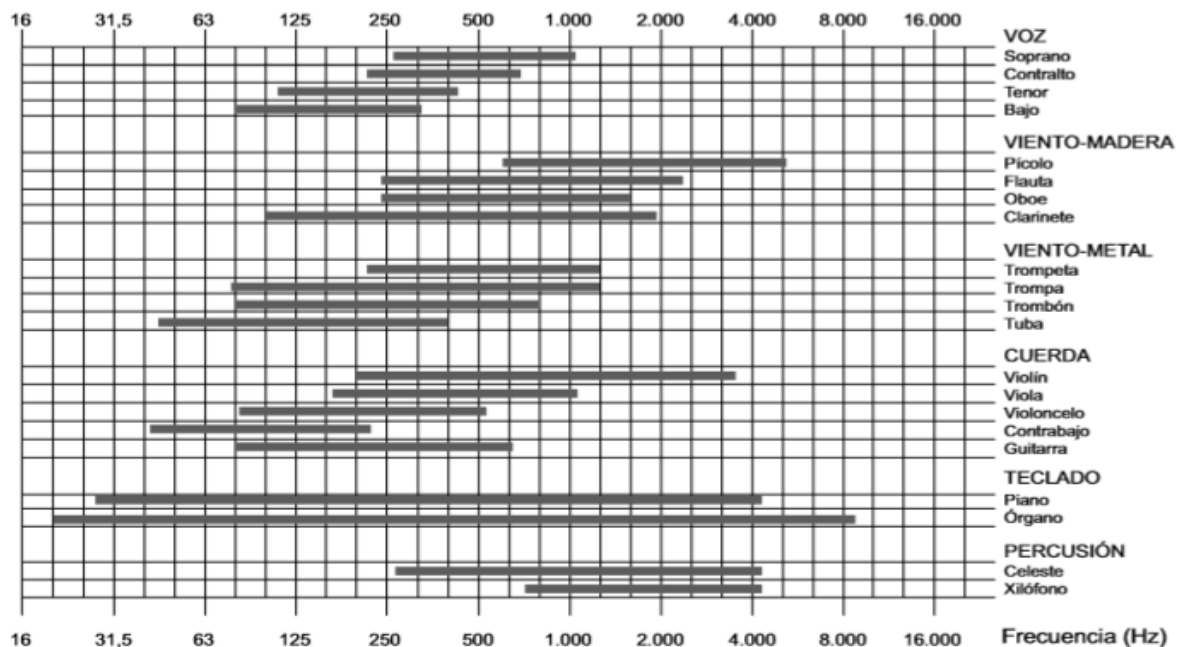


Figura 3 Banda de frecuencia de instrumentos musicales y de la voz

Fuente: (Isbert, 1998, pág. 32)

“El sonido no se puede ignorar, se debe apreciar. En la medida en que aprendamos a valorar el sonido, podremos alcanzar un mejor dominio de él y, por lo tanto, una disminución de la contaminación acústica y una mejoría sustancial de nuestro entorno.” (Rodríguez, 2013, pág. 155)

El sonido se caracteriza por cuatro conceptos fundamentales: Frecuencia, amplitud, duración y longitud de onda. Ver en anexo 3.

3. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

“La arquitectura acústica, bajo la definición de Francesc Daumal, es “el arte de crear o proyectar y construir la acústica, es decir, de diseñar los diferentes sonidos conforme a una intención acústica relacionada con los deseos del diseñador, y construirlos con la ayuda de los conocimientos físico-acústicos, los materiales y los métodos vinculados a la misma construcción arquitectónica.” (Rodríguez, 2013, pág. 17)

La acústica arquitectónica se concentra en aplicar el concepto de la acústica en la arquitectura para lograr dos cosas, un adecuado aislamiento del sonido y un adecuado acondicionamiento acústico dentro de un espacio habitable. Para el desarrollo de una actividad sonora en un espacio, se establecen unas condiciones acústicas, de acuerdo a los parámetros requeridos. En esta investigación el estudio se centra en un espacio cerrado dentro de la arquitectura de salas polivalentes, que requieren cualidades específicas acústicas y arquitectónicas para la vista y el oído.

No obstante, es importante tener en cuenta que la acústica cobra importancia en cualquier proyección arquitectónica frente a la correcta escucha en vivienda, comercio, industria y espacios públicos o gubernamentales, entre otros, pues la importancia de la acústica arquitectónica está enfocada al aprovechamiento de la propagación del sonido en un espacio. El aprovechamiento de la propagación del sonido se puede realizar a través de tres aspectos como se mencionó anteriormente:

1. Aislamiento acústico
2. Acondicionamiento acústico
3. Acústica urbanística

Dentro de esta investigación se conceptualizarán solo el aislamiento y el acondicionamiento, ya que es necesario mencionar la diferencia y el complemento que existe entre estos dos para un proyecto arquitectónico.

3.1 AISLAMIENTO ACÚSTICO

“Se entiende por aislamiento acústico a la protección de un recinto contra la penetración de sonidos que interfieran a la señal sonora deseada. Las fuentes que originan estos sonidos pueden estar en el interior o en el exterior del edificio.” (López, 1999, pág. 68)

El aislamiento acústico es la técnica que se encarga por medio de los materiales de aislar los ruidos que se generan dentro de un proyecto en la parte externa hacia la parte interna. La función de la materialidad en el aislamiento acústico, se basa principalmente en generar una disminución de la transmisión de los ruidos que no son adecuados ni deseados dentro de los espacios.

Es importante tener en cuenta el aislamiento acústico dentro de las proyecciones arquitectónicas, ya que una idea proyectada debe garantizar un gran porcentaje de reducción en la contaminación auditiva desde el exterior al interior y en sentido contrario, ya que la localización de un auditorio en una zona residencial o en un sector tranquilo, puede ser un agente sonoro molesto para los vecinos. Para la arquitectura de auditorios, teatros, salas polivalentes, etc. El aislamiento acústico se vuelve más importante ya que son espacios en donde los ruidos deben mitigarse para evitar la contaminación auditiva por completo. Ver figura número 4.

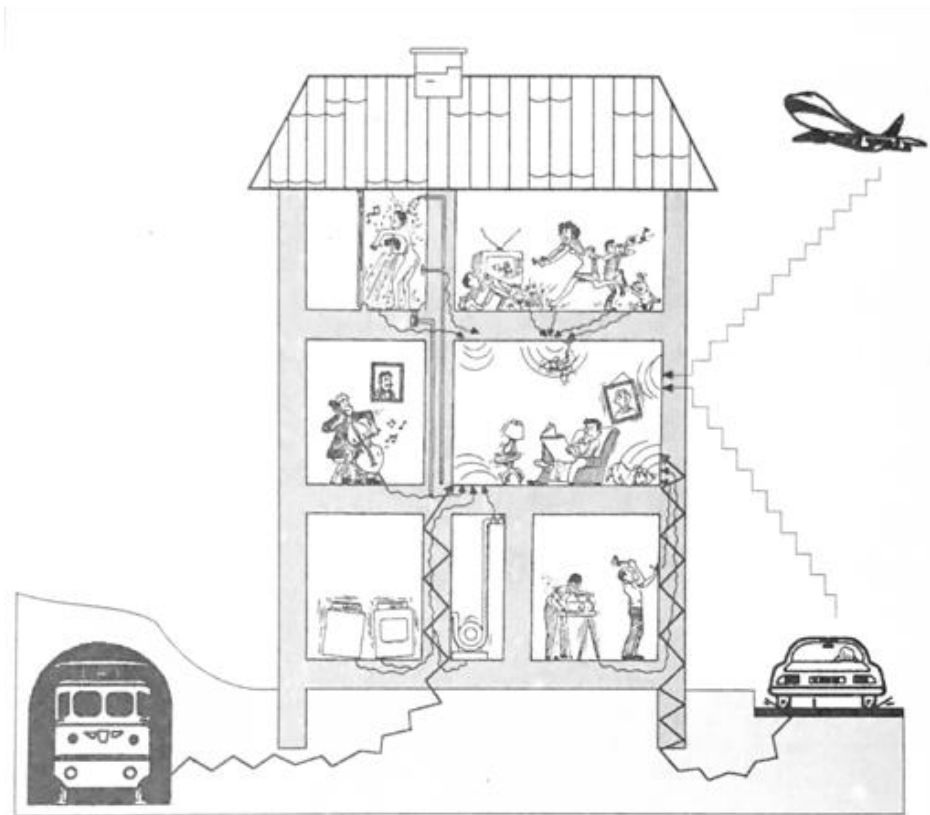


Figura 4 Transmisión de la energía sonora en un edificio

Fuente: (López, 1999, pág. 68)

3.2 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

“Dicho de una manera simple, el acondicionamiento acústico consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo.” (Isbert, 1998, pág. 19) De acuerdo a esto, el acondicionamiento acústico va sujeto a las características de diseño que un auditorio debe alcanzar acústicamente. En este caso, el acondicionamiento acústico empieza a interpretar los parámetros de evaluación para que un espacio cuente con un mejor comportamiento del sonido a partir de la forma y el revestimiento de materiales.

El objetivo principal del acondicionamiento acústico se da con el aprovechamiento total del espacio, es decir, como la forma y el revestimiento de materiales se complementan para que las proyecciones internas lleguen a considerarse adecuadas en el acondicionamiento acústico. Ver figura número 5.

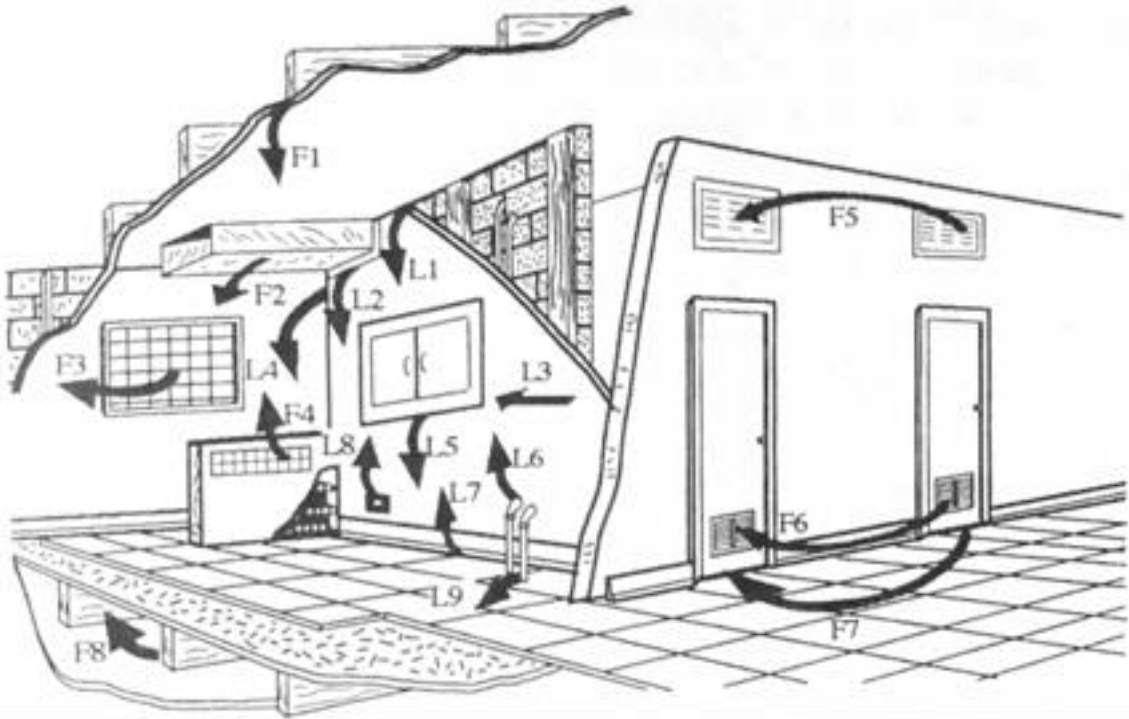


Figura 5 Ejemplo de penetración de diferentes tipos de ruidos en un recinto

Fuente: (López, 1999, pág. 71)

Además de esto, “*el objeto del acondicionamiento acústico es proporcionar la máxima calidad acústica posible al mensaje sonoro emitido en una sala.*” (J Llinares, 2008, pág. 121)

Como se nombró anteriormente, el aislamiento y el acondicionamiento acústico se diferencian por el tratamiento que cada uno genera dentro de un proyecto, pero su complemento se convierte importante a la hora de implementarlo conjuntamente dentro de las proyecciones.

Dentro de esta investigación es más esencial tener en cuenta la evaluación de criterios para acondicionar acústicamente un espacio, ya que solo se está teniendo en cuenta la parte interna de una sala polivalente.

Dentro del campo de la Acústica Arquitectónica existen parámetros que permiten dar una caracterización acústica de un recinto. En este caso, la proyección arquitectónica del auditorio León de Greiff, estudiará los parámetros acústicos que permiten evidenciar el comportamiento de la energía sonora al interior de este. De igual manera conceptualizar estos parámetros de evaluación son el punto de partida para realizar un análisis en donde se interprete mejor los conceptos que se están teniendo en cuenta.

De acuerdo a lo anterior, los parámetros de evaluación que se tendrán en cuenta para caracterizar la sala polivalente del auditorio León de Greiff son los siguientes:

- A. Distribución sonora (SPL)
- B. Tiempo de reverberación (RT)
- C. Índice de transmisión de la palabra (STI)
- D. Pérdida de la articulación de las consonantes (%ALCONS)
- E. Claridad de la voz C50
- F. Claridad musical C80

Además de esto, se realiza una auralización como herramienta que permite a partir de una estimación acústica, tener un concepto auditivo de los espacios.

A. DISTRIBUCIÓN SONORA (SPL)

Define los valores a los cuales están siendo emitidos los sonidos y que son interpretados por el oído humano. Cuando se habla de nivel de presión sonora se busca conocer que tan intenso es un sonido, es decir, que tan alto o que tan bajo una fuente emite una señal. Las condiciones iniciales del ser humano establecen un rango de escucha antes de llegar al umbral de dolor o pérdida completa de la capacidad auditiva. Este rango es de 0dBA a 120dBA con un rango frecuencial de 20Hz hasta 20000Hz pero que a medida que pasan los años y los lapsos de tiempo a exposiciones frente a ruidos, estos rangos disminuyen. Una de las enfermedades más comunes e inevitables es la pérdida de la audición.

“El nivel de presión sonora se define como 20 veces el logaritmo de la relación entre el valor eficaz de la presión sonora y el valor eficaz de la presión umbral de audición, a 1KHz” (Isbert, 1998, pág. 401)

Para calcular el nivel de presión sonora se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$SPL = 20 * \log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)$$

Donde:

SPL = Nivel de presión sonora (dB)

P = Variaciones de presión (Pa)

Pref = Presión de referencia de escucha del ser humano equivalente a 20μPa

Tiempo de Reverberación (S)

B. TIEMPO DE REVERBERACIÓN (RT)

“Se define el tiempo de reverberación (de forma abreviada RT) a una frecuencia determinada como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial.” (Isbert, 1998, pág. 63)

Este tiempo determina el momento en que un sonido audible es emitido por una fuente sonora hasta llegar a ser inaudible. Existen diferentes ecuaciones que nos permiten calcular este tiempo de reverberación, sin embargo, la ecuación más utilizada por su simplicidad se formula gracias a Wallace Clement Sabine, a quien se atribuye la unidad de medida de absorción acústica que está directamente relacionada con el tiempo de reverberación de una sala. Este físico determinó que la diferencia en cuanto a intensidades frente a un sonido audible hasta ser inaudible es de aproximadamente 60dB. En algunas ocasiones donde los recintos tienen dimensiones muy pequeñas es imposible calcular una caída de 60dB, para estos eventos se calculan otros tiempos de reverberación como RT20 o RT30.

La ecuación descrita por Sabine relaciona área con respecto a absorción la cual se muestra a continuación:

$$RT = \frac{0,161 * V}{S * \alpha_{mid}}$$

Donde:

V= Volumen del recinto en m³

S = Superficie del recinto en m²

α_{mid} = coeficiente de absorción medio del recinto

En el acondicionamiento acústico de un recinto es importante evaluar el tiempo de reverberación, ya que indica la forma en que los sonidos son auditivamente percibidos y pueden definirse subjetivamente en los conceptos de “sala muerta” o “sala viva” es decir, que tan reverberante es un recinto. Teniendo en cuenta el uso final de un recinto se recomiendan los tiempos de reverberación que se encuentran en la tabla 1. Dentro de esta investigación se tendrá en cuenta el tiempo de reverberación para una sala polivalente en donde su RTmid en estado de ocupación completo, se encuentra entre 1.2-1.5

“En general, el valor más adecuado de RTmid depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo.” (Isbert, 1998, pág. 63)

Tabla 1 Márgenes de valores recomendados de RTmid en función del tipo de sala (recintos ocupados)

TIPO DE SALA	RT MID – ESTADO DE OCUPACIÓN COMPLETO (S)
Sala de conferencias	0.7 – 1.0
Cine	1.0 – 1.2
Sala polivalente	1.2 – 1.5
Teatro ópera	1.2 – 1.5
Sala de conciertos (música de cámara)	1.3 – 1.7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1.8 – 2.0
Iglesia/catedral (órgano y canto oral)	2.0 – 3.0
Locutorio de radio	0.2 – 0.4

Elaboración propia. **Fuente:** (Isbert, 1998, pág. 64)

“La reverberación es directamente proporcional al volumen del espacio e inversamente proporcional a la absorción presente en el espacio y que se manifiesta en los materiales y elementos incluidos; de esta forma, a mayor volumen espacial habrá mayor T, y a mayor presencia de materiales y elementos absorbentes habrá menor T.” (Rodríguez, 2013, pág. 57)

C. ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (STI)

El índice de transmisión del habla (speech Transmission Index) está directamente relacionado con el nivel de inteligibilidad de un recinto, este se comporta en un rango de 0 a 1 donde 0 equivale a inteligibilidad nula y 1 es máxima inteligibilidad. Este valor depende de los materiales inmersos en un recinto y se calcula con la siguiente ecuación:

$$STI = \frac{S}{N} - \frac{15}{30}$$

Donde:

STI: Índice de transmisión del habla

S/N: Signal to noise, la relación que existe dentro del espacio de señal a ruido

El índice STI (“Speech Transmission Index”), definido por Houtgast y Steeneken, permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). El STI se calcula a partir de la reducción de los diferentes índices de modulación de la voz debido a la existencia de reverberación y de ruido de fondo en una sala.” (Isbert, 1998, pág. 373)

Esta relación señal a ruido se mide teniendo en cuenta la intensidad con la que una señal sonora llega a ser percibida por un oyente respecto al ruido de fondo propio medido del recinto. Se busca que esta relación sea mayor en la señal para que sea inteligible en el oyente. Según el resultado de STI una sala se puede clasificar según los siguientes rangos de inteligibilidad:

$STI \leq 0,3$ MALA
 $0,3 \leq STI \leq 0,45$ POBRE
 $0,45 \leq STI \leq 0,6$ DÉBIL
 $0,6 \leq STI \leq 0,75$ BUENA
 $0,75 \leq STI \leq 0,9$ EXCELENTE

Se recomienda como mínimo que el índice de transmisión del habla para una sala polivalente sea por lo menos mayor o igual a 0,45 esto equivale a un 80% de comprensión de palabras y frases aproximadamente.

D. PÉRDIDA DE LA ARTICULACIÓN DE LAS CONSONANTES (%ALCONS)

La pérdida de la articulación de las consonantes es otro principio que se debe analizar en el momento de hablar de transmisión de sonidos generados por la voz humana. Este valor de pérdida se busca que sea mínimo, lo que indicaría que la articulación de la palabra percibida sea clara en un punto del área de audiencia en el momento en que una persona en un espacio destinado como locutorio está transmitiendo un mensaje. Uno de los métodos antiguos utilizados para medir la pérdida de la articulación en los sonidos de las palabras, se propuso por el investigador V.M.A PEUTZ quien ideó un cuestionario para un público. *“Peutz dedujo que el valor de %ALCons en un punto dado se podía determinar, simplemente, a partir del conocimiento del tiempo de reverberación RT y de la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo LD y de campo reverberante LR en dicho punto.”* (Isbert, 1998, pág. 67). Después de que el público escuchara una serie de logátomos (consonante-vocal-consonante) debía escribir lo que habían entendido y según el número de aciertos sacar un porcentaje.

Hoy en día se conocen otras variables en cuanto a parámetros acústicos que permiten calcular este porcentaje de manera precisa:

$$\%ALCONS = \frac{200 * r^2 * RT^2}{V * Q} \quad \text{si } r \leq 3,6Dc$$

$$\%ALCONS = 9 * RT \quad \text{si } r > 3,6Dc$$

Donde:

r= distancia entre emisor y receptor en metros.

RT= tiempo de reverberación de la sala en segundos

V= volumen de la sala en metros cúbicos

Q= direccionalidad de la fuente emisora, en este caso es la voz con posición frontal Q=2

La distancia crítica de un recinto determina el momento en que el campo directo de energía sonora y el campo reverberante son equivalentes. Dentro de un espacio se debe calcular esta distancia la cual es fundamental para evaluar en qué posición del área de audiencia se pueden presenciar diferentes fenómenos acústicos que afecten la calidad sonora de los sonidos transmitidos por la fuente, en este caso la fuente se encuentra ubicada en un punto focal o tarima y emite señales hacia todo el auditorio y con base en el resultado de distancia crítica, elementos como difusores o

absorbentes acústicos son necesarios para variar una serie de parámetros logrando una mayor distancia de campo directo evitando problemas de inteligibilidad en el público.

La distancia crítica de un recinto puede calcularse por la siguiente ecuación:

$$Dc = 0,14\sqrt{Q * R}$$

Donde:

Q=Direccionalidad de la fuente

R=constante de la sala

La variable constante de la sala está relacionada con la superficie total que ocupa el recinto y la absorción media de este espacio.

E. CLARIDAD DE LA VOZ (C50)

“Se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la que le llega después de los primeros 50 ms. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz. Según L.G. Marshall, el valor representativo de C50 se calcula como media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, y recibe el nombre de “speech average”. (Isbert, 1998, pág. 183)

$$C50 = \frac{\text{ENERGÍA HASTA 50MS}}{\text{ENERGÍA A PARTIR DE 50MS}} \text{ (en dB)}$$

Este valor es medido teniendo en cuenta un análisis de reflexiones del recinto en evaluación. Se realiza una comparación en las primeras reflexiones capturadas en un lapso de tiempo no mayor a los 50mseg. Las relaciones logarítmicas entre estas variaciones de intensidad del emisor-receptor determinan la claridad con que un mensaje por voz hablada es entendido. Se busca que el valor C50 sea alto para evitar falencias respecto a la inteligibilidad en sonidos como, por ejemplo: discursos, conferencias, simposios u otros donde el objetivo principal sea el de transmitir con claridad un mensaje.

F. CLARIDAD MUSICAL (C80)

“La claridad musical C80 indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical. Según Cremer, el C80 se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la que le llega después de los primeros 80 ms, calculada en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz. (Isbert, 1998, pág. 230)

$$C80 = \frac{\text{ENERGÍA HASTA 80MS}}{\text{ENERGÍA A PARTIR DE 80MS}} \text{ (en dB)}$$

La claridad musical se calcula a partir de la diferencia en intensidades medidas en el emisor con respecto al receptor en un lapso de tiempo no mayor a los 80mseg. Este valor determina la claridad con que se percibe una señal musical transmitida. Se busca que en recintos destinados con fines musicales como: teatros, auditorios, salas de concierto entre otros, tengan un valor de C80 alto medido en cualquier punto del área de audiencia garantizando claridad en la escucha de estos sonidos.

G. AURALIZACIÓN

“Proceso a través del cual es posible realizar una escucha, en cualquier punto de un recinto, de un mensaje oral o un pasaje musical, con la particularidad de que ello se lleva a cabo de forma virtual.” (Isbert, 1998, pág. 381)

La auralización es una técnica que se usa dentro de una simulación acústica para recrear el comportamiento del sonido dentro de un espacio. Una auralización sirve como instrumento durante el proceso de diseño de una proyección y también sirve como herramienta de análisis de proyecciones existentes.

4. LA GEOMETRÍA ACÚSTICA

“El método geométrico se basa, fundamentalmente, en la propagación rectilínea del sonido, que según el principio de Fermat, toda onda se propaga por el camino más rápido, que para velocidad de propagación constante, es el más corto, y en la propagación libre de obstáculos es la línea recta entre dos puntos.” (J Llinares, 2008, pág. 135)

La geometría acústica para estudiar la propagación del sonido dentro de un espacio, siempre se va a complementar con la forma geométrica, ya que, de acuerdo a los parámetros de los sonidos y las visuales óptimas dentro del espacio, se empiezan a distribuir los elementos que cierran la sala, los elementos internos que hacen parte de la sala y los materiales que acompañan la forma geométrica de la sala.

Según la teoría (Arozmendi, 1980) (Isbert, 1998), (J Llinares, 2008), (Alanís, 2012), ya existen unos criterios establecidos en el diseño para la geometría de las salas, y aunque se tengan en cuenta en el proceso para proyectar un espacio, siempre se presentan modificaciones pues la arquitectura a través del tiempo ha estipulado una tipología que constantemente presenta innovaciones para diferenciarse de todas las otras proyecciones.

Es importante en este capítulo introducir los conceptos que permiten comprender el porqué de las formas para una sala polivalente.

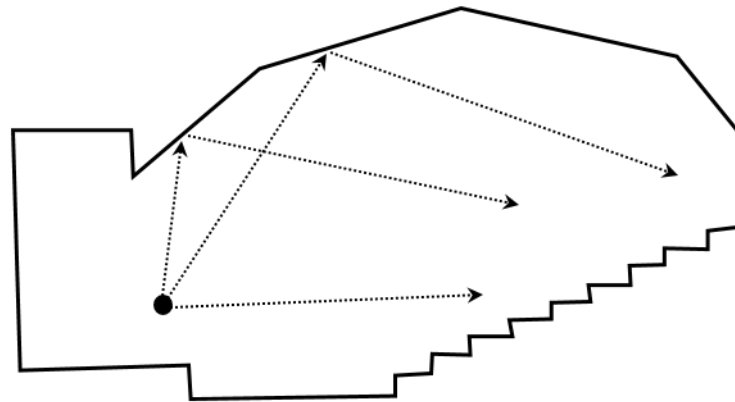
4.1 EL COMPORTAMIENTO GEOMÉTRICO

La proyección de espacios dedicados a la escenografía según la teoría, ya establecen unos criterios en el diseño. Los criterios se estipulan según el espacio que se quiera proyectar, ya que unos son destinados solo para uso musical y otros mezclan el uso musical con el del habla. Dentro de esta investigación se agruparon los criterios con los que debe contar un auditorio y una sala polivalente, debido al auditorio tomado como estudio de caso, su uso se mezcla con actividades que requieren un espacio multifuncional.

Los criterios que se establecen en la teoría existente (Alanís, 2012), se aplican en las proyecciones arquitectónicas según las características acústicas y geométricas deseadas. No obstante, las recomendaciones para la forma geométrica pueden variar y finalmente su importancia radica en que el espacio cuente con adecuada propagación del sonido y adecuadas visuales hacia el escenario.

Según la teoría (Alanís, 2012) no se recomiendan las formas cilíndricas o las formas en cúpula, ya que tienden a focalizar el sonido, evitando dentro de los espacios la homogeneidad y uniformidad correcta del sonido. Para estos casos se requeriría un desarrollo más amplio de la acústica arquitectónica para poder proyectar un espacio adecuado acústicamente.

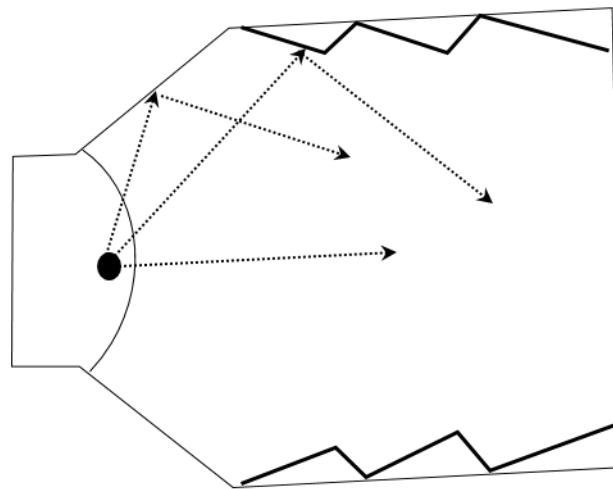
Por lo general para un auditorio y una sala polivalente que contenga un gran volumen, se recomienda la geometría trapezoidal en planta y corte, pues su conformación es más funcional para el comportamiento del sonido y el comportamiento de las visuales. Esta geometría trapezoidal es más práctica cuando se introducen elementos que formen quiebres en todas las superficies, para permitir una propagación más adecuada del sonido. Ver figura número 6 y 7.



Quiebres en el techo favorecen la difusión

Figura 6 Planos inclinados en el techo

Elaboración propia. **Fuente:** (Alanís, 2012, pág. 116)



Quiebres en laterales evitan paralelismo y facilitan difusión

Figura 7 Quiebres en muros laterales

Elaboración propia. **Fuente:** (Alanís, 2012, pág. 116)

La forma geométrica para estos espacios, debe contar con dimensiones acordes al espacio, es decir, el volumen del objeto, el ancho del objeto y el largo del objeto, estas dimensiones son importantes para proporcionar a los parámetros físicos un resultado óptimo en el espacio. (Arozamendi, 1980), (Isbert, 1998), (J Llinares, 2008), (Alanís, 2012). Es decir, que la composición de la forma geométrica va analizando simultáneamente los parámetros físicos para que la presión sonora SPL, el tiempo de reverberación, el índice de transmisión de las palabras STI, la articulación de las consonantes %ALCONS, la claridad de la música C80 y la claridad de la voz C50 tengan un óptimo desarrollo dentro del espacio.

Además de tener en cuenta las recomendaciones de la forma geométrica para que los parámetros acústicos sean óptimos, se introducen otros conceptos que permiten complementar el desarrollo del comportamiento geométrico para la total comprensión de la finalidad de la forma de un objeto arquitectónico dedicado a las actividades escenográficas.

Los siguientes conceptos se conceptualizan porque ayudan a entender el comportamiento del sonido desde el aspecto geométrico.

A. REFLEXIÓN

La reflexión es el efecto que se genera a partir de la capacidad que tienen los elementos para reflejar energía sonora incidente sobre ellos, ver figura número 8. Cuando un sonido es emitido por una fuente sonora, se generan millones de ondas que se empiezan a propagar dentro del espacio, estas ondas al encontrar superficies que obstaculizan su recorrido, crean una reflexión y cambian el recorrido en otra dirección. La importancia de la forma geométrica es que las ondas reflejadas, se distribuyan uniformemente para toda la sala.

“El sonido se refleja sobre un muro duro. Las superficies planas, lisas, grandes y duras son superficies comunes en las salas de conciertos. El material de las paredes de una sala no debe vibrar, al contrario se hacen duras y rígidas para reflejar el sonido y conservar su energía para ser reflejado al público.” (Restrepo, El espacio de la música , 2011, pág. 49)

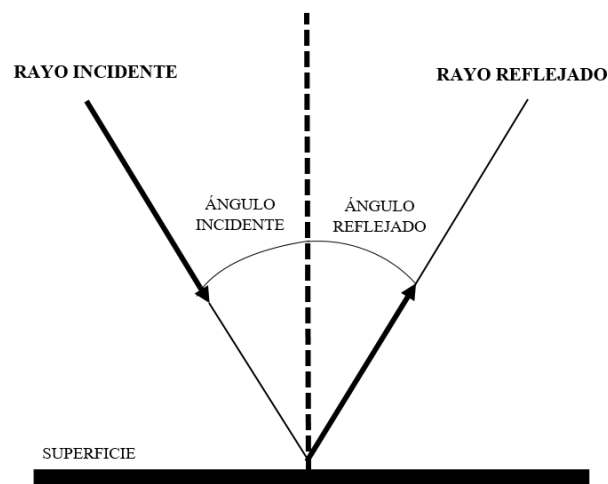


Figura 8 Reflexiones de la onda sonora

Elaboración propia

B. ABSORCIÓN

La absorción es la capacidad que presentan los materiales para disipar con mayor facilidad la energía sonora incidente. Cuando la onda sonora choca con las superficies, una parte de la energía de la reflexión de esas ondas no se vuelve a reflejar, sino que es absorbida. Ver figura número 9.

“Si la superficie es suave el sonido se absorbe en ella. La absorción es generalmente evitada en las salas de concierto por que suprime o apaga la importante energía del sonido. La audiencia y la silletería son inevitablemente las áreas más absorbentes de una sala.” (Restrepo, El espacio de la música , 2011, pág. 49)

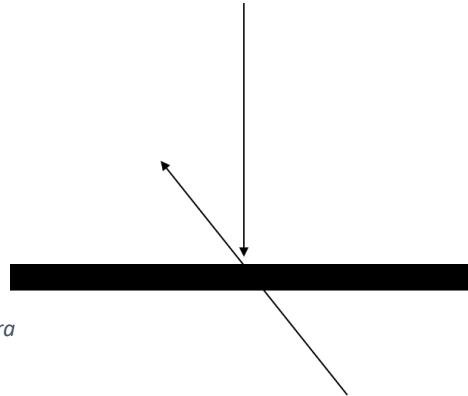


Figura 9 Absorción de la onda sonora

Elaboración propia

C. DIFUSIÓN

La difusión es el efecto de algunos materiales para difundir la energía sonora incidente sobre ellos, extendiéndose y generando una uniformidad del sonido en todo el espacio. Ver figura número 10.

“Una superficie áspera y rugosa, un difusor, dispersa el sonido en todas las direcciones. Los difusores tienen muchos usos, como suprimir ecos dañinos causados por superficies como el muro detrás de la audiencia en una sala.” (Restrepo, El espacio de la música , 2011, pág. 49)

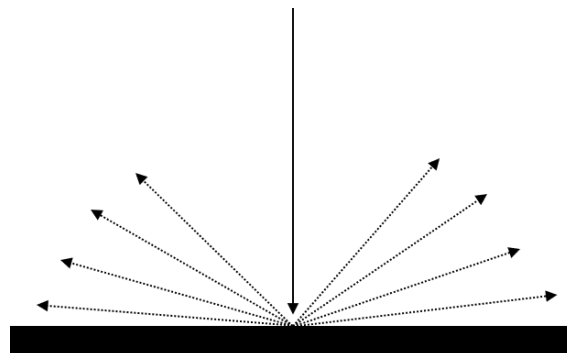


Figura 10 Difusión de la onda sonora

Elaboración propia

4.2 EL COMPORTAMIENTO DEL SONIDO EN LA FORMA GEOMÉTRICA

El comportamiento del sonido en la geometría acústica se estudia a partir de la teoría de rayos sonoros, es por esto la importancia de conceptualizar la reflexión, la absorción y la difusión de la energía de las ondas sonoras.

“En ella se supone que de la fuente sonora emerge un número finito de rayos sonoros, que siguen la dirección de propagación de las ondas sonoras. Estos rayos no poseen ninguna realidad física, son simplemente líneas perpendiculares a los frentes de onda. Su aplicación se basa en analogías ópticas.” (J Llinares, 2008, pág. 130)

Es indispensable realizar un trazado de rayos, porque por medio de este, se empieza a tener una idea de la composición para la forma geométrica y además de esto, estudia el espacio para pronosticar las zonas que pueden presentar conflictos en la propagación uniforme del sonido.

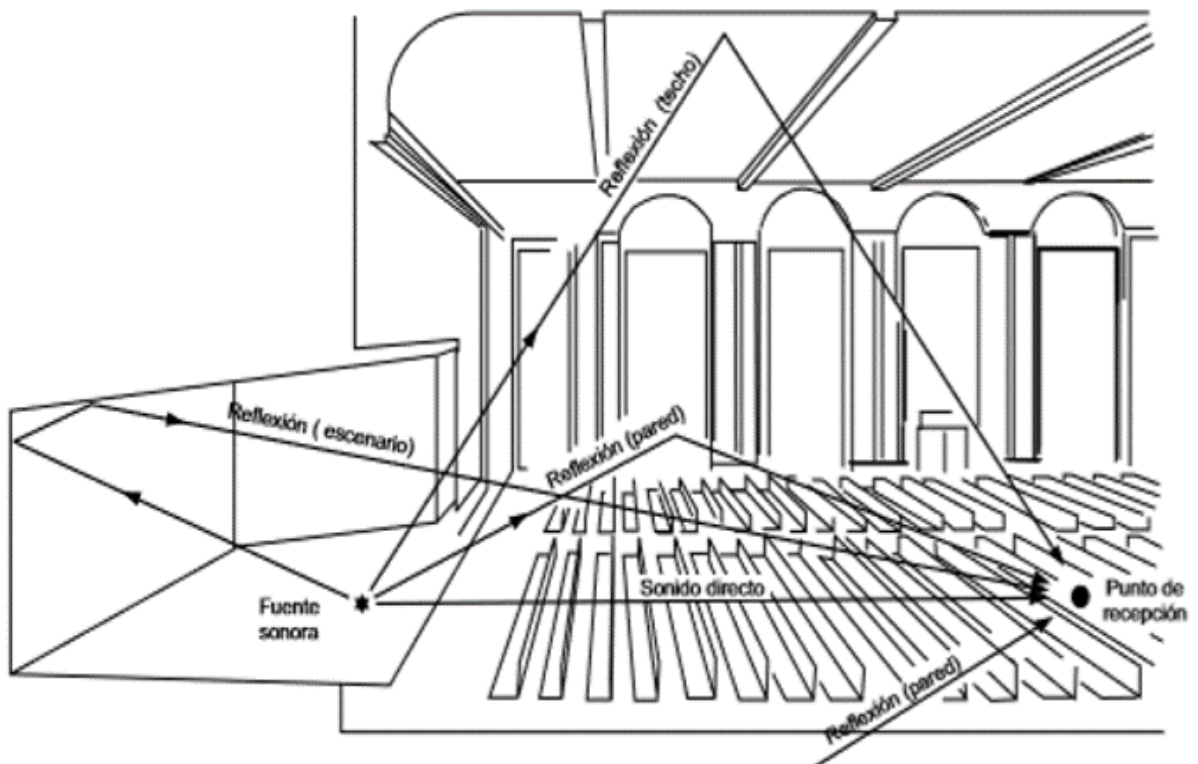


Figura 11 Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones de un receptor

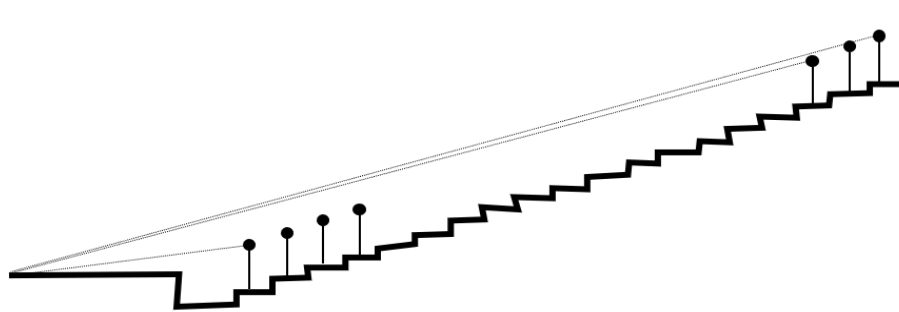
Fuente: (Isbert, 1998, pág. 51)

Para esta investigación solo se aplicará la teoría de rayos sonoros para las primeras reflexiones, como se ve en la figura número 11, ya que no es útil para esta investigación estudiar todas las reflexiones que un sonido pueda generar, pues habría que tener en cuenta la acústica estadística que es la encargada de evaluar la energía sonora completa de un espacio.

4.3 EL COMPORTAMIENTO VISUAL

La geometría de la acústica además de entender el comportamiento del sonido, debe entender el comportamiento de las visuales. Ya que el sentido de la vista es igual de importante al sentido del oído en las proyecciones arquitectónicas. El objetivo de la forma geométrica para el comportamiento visual es establecer las distancias de las zonas del público hacia la zona del escenario. Es recomendable que este espacio cuente con una inclinación para que cada espectador tenga una línea visual más alta a la línea visual de la persona que se encuentra en frente de esta. *“la sobreelevación de un oyente respecto al que le precede favorece un aumento del ángulo de escucha (se llama así al ángulo formado por la inclinación del suelo y la visual a la escena).”* (Arozmendi, 1980, pág. 90) Además de manejar una inclinación, es recomendable que los asientos de cada fila se encuentren intercalados para evitar obstáculos visuales entre espectadores.

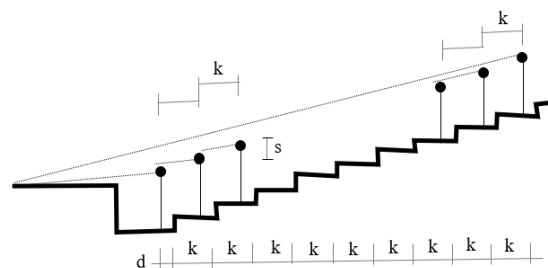
En las figuras número 12 y 13 se observan las recomendaciones más adecuadas para realizar el trazado de rayos visuales.



Para la correcta visión y audición, la inclinación o escalonamiento del suelo es indispensable

Figura 12 Líneas visuales

Elaboración propia. **Fuente:** (Arozmendi, 1980, pág. 90)



Distancia $d = 30$ cm

Sobreelevación $\begin{cases} s_{\min} = 6,0 \text{ cm} \\ s_{\text{medio}} = 12 \text{ cm} \end{cases}$

Figura 13 Procedimiento gráfico para evitar la pantalla acústica

Elaboración propia. **Fuente:** (Arozmendi, 1980, pág. 90)

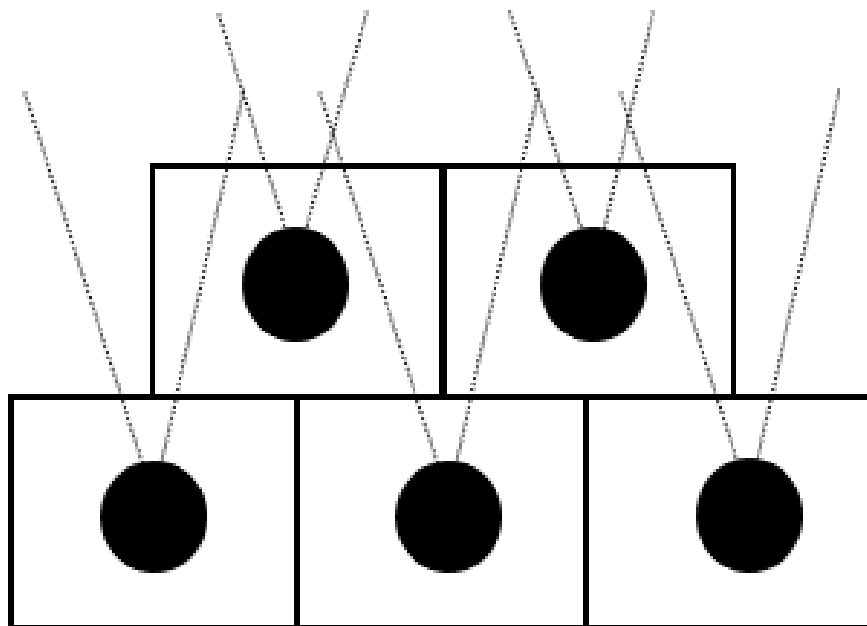


Figura 14 Interpretación de silletería intercalada

Elaboración propia

En la figura número 14 se realiza una interpretación en planta del posicionamiento recomendado de la silletería en una sala para evitar los obstáculos visuales por las personas que se ubican en las filas delanteras.

5. LA MATERIALIDAD

“La materialidad es la base de toda arquitectura, sin ella no puede existir” (Roa, 2002, pág. 191)

La arquitectura es materialidad, actualmente existen millones de materiales que cumplen con cualidades distintas dentro de la arquitectura y esto se da por el tipo de proyecciones a las que se quiere llegar en la construcción, la materialidad permite soportar e innovar la conformación desde la estructura hasta el más mínimo detalle para un acabado. El comportamiento de la materialidad en la arquitectura, se desarrolla según el objetivo del proyecto, siempre teniendo en cuenta cual es la función que se le quiere dar al material.

En el libro “Construir como proyecto: una introducción a la materialidad arquitectónica” (García, 2011) se plantea el objetivo de la materialidad en la arquitectura a partir de tres exigencias, sostener, cerrar y construir.

La función de las tres exigencias las explica de la siguiente manera:

1. **Sostener:** *“el conjunto de cargas actuantes de acuerdo a un comportamiento estructural definido.”*
2. **Cerrar:** *“los espacios habitables de acuerdo a los requerimientos a que serán destinado.”*
3. **Construir:** *“lo proyectado, sintetizando la resolución de la estructura y del cerramiento en un sistema constructivo coherente.”* (García, 2011, pág. 27)

Estas tres exigencias explican dentro de esta investigación que la materialidad cumple con un proceso para las proyecciones, de acuerdo a (García, 2011) un proyecto arquitectónico debe contar con los elementos que van a soportar el objeto, debe contar con un cerramiento exterior del objeto e interior de todos los espacio con los que cuenta estableciendo las características requeridas y su construcción se da a partir de la agrupación del soporte y del cerramiento escogido.

Dentro de esta investigación la exigencia más importante a tener en cuenta es la del cerramiento, ya que el desarrollo va dirigido a entender el comportamiento del sonido dentro de un espacio con revestimiento de materiales. El cerramiento de un proyecto tiene un requerimiento para cada proyecto, en algunos casos, el material se destina para el componente estético, el confort térmico, el confort lumínico, entre otros. *“que los criterios de “cerramiento” surjan de compatibilizar las necesidades de aislación, protección, durabilidad, apariencia, etc., con las “intenciones” de liviandad ó pesadez, transparencia ú opacidad, apertura ó cerrazón, etc.”* (García, 2011, pág. 33) El objetivo de este capítulo para esta investigación es conceptualizar el cerramiento como revestimiento interior para el confort acústico.

“Los materiales y estructuras para tratamiento acústico se pueden describir como aquéllos que tienen la propiedad de absorber o reflejar una parte importante de la energía de las ondas acústicas que chocan contra ellos. Se eligen no sólo para asegurar las necesarias condiciones acústicas, sino también en arquitectura y diseño de interiores.” (López, 1999, pág. 77)

Después de definir la proyección de la forma geométrica, se escogen los materiales para revestir la forma según las características acústicas deseadas. Los materiales escogidos se aprovechan para aislar o para acondicionar el espacio de diferentes maneras, *“el aislamiento acústico consiste en impedir la propagación de una señal sonora, mediante diferentes obstáculos reflectores, para lo que son necesarias paredes duras y pesadas, que reflejan el sonido, pero no lo absorben.”* (López, 1999, pág. 77). De acuerdo a eso, los materiales para el aislamiento acústico dentro de esta investigación se toman como el cerramiento del volumen de la sala completa y su conceptualización se tiene en cuenta, pero no se profundiza por el interés en el revestimiento que acondiciona la forma geométrica. Por otro lado, también es importante aclarar que el aislamiento acústico para el cerramiento de la sala no cumple con características para que el sonido se comporte de acuerdo a lo deseado acústicamente. En cambio, se recurre al cerramiento que reviste la forma acondicionándolo adecuadamente para que los parámetros físicos tengan un mejor desarrollo.

Para tener en cuenta el comportamiento óptimo del sonido en una sala se debe considerar que los materiales deben cumplir con características acústicas, pues su función permitirá que el sonido se comporte de acuerdo a lo escogido. (Alanís, 2012, pág. 73) dice que *“un material es acústico cuando tiene un promedio de absorción de 0.50 (NRC) o cuando el coeficiente de absorción a alguna frecuencia es de 0.50 o más.”*

En términos de la acústica, las siglas NRC (Noise reduction coefficient) coeficiente de reducción de ruido, hace referencia a las propiedades del material en cuanto a los coeficientes de absorción con el que debe contar un material dependiendo de las frecuencias del sonido, es por este motivo, que se caracterizan como materiales óptimos acústicamente.

Cuando el material del cerramiento que aísla tiene un coeficiente de absorción muy bajo se clasifica como material reflejante, un ejemplo de estos, es el concreto, el ladrillo, el yeso, entre otros.

En la figura número 15 según (López, 1999) se clasifican los materiales que se caracterizan como absorbentes acústicamente para revestir el cerramiento de la forma geométrica.

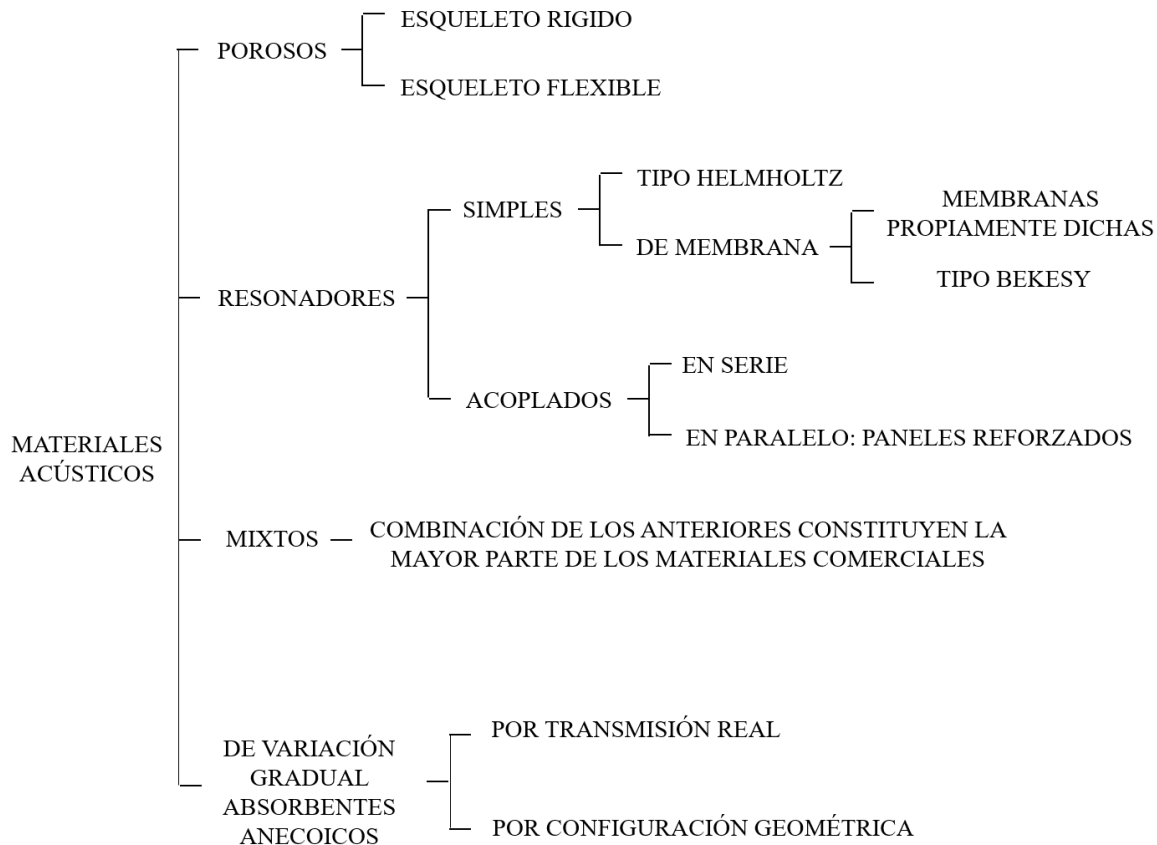


Figura 15 Diagrama de los materiales absorbentes acústicos

Elaboración propia. **Fuente:** (López, 1999, pág. 79)

El tema de los materiales, su uso, sus especificaciones y sus coeficientes de absorción se estudia de acuerdo a cada forma geométrica y de acuerdo a cada parámetro físico que se vaya a tener en cuenta de la sala. La teoría existente (López, 1999) da unas recomendaciones que se han venido estudiando a través del tiempo, sin embargo, actualmente los materiales acústicos presentan más desarrollo tecnológico y de innovación dentro de la acústica y su objetivo siempre se va a fundamentar en proporcionar un revestimiento acorde a la forma geométrica para que el comportamiento del sonido sea óptimo en cada espacio de la sala. Además de esto, porque de acuerdo al revestimiento de material que se use, la sala puede tener un comportamiento del sonido que refleje las ondas sonoras, que absorba las ondas sonoras o que incluya elementos para difundir las ondas sonoras.

MÉTODO EXPLORATORIO ANALÍTICO

6. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS PARA ENTENDER LA GEOMETRÍA

“El arquitecto trabaja con la forma: la descompone, estudia sus propiedades, la reconstruye; forcejea con ella y la manipula para lograr la respuesta más clara y congruente a un problema.”
(Arís, Las variaciones de la identidad, ensayo sobre el tipo en arquitectura , 2014)

6.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL AUDITORIO

El auditorio León de Greiff, en la figura número 16, se observa que cuenta con un área total de 1584.74 m², y está zonificado por: un detrás de escena, el escenario con foso y es espacio para el aforo. En la figura número 17 se observa que tiene capacidad para 1534 personas sentadas, en la sección baja que es la más cercana al escenario, cuenta con 448 sillas, en la sección media cuenta con 927 sillas y en la sección alta cuenta con 159 sillas. En la figura número 18 el auditorio cuenta con 43.05 mts de profundidad por 36.82 de ancho y aunque sus alturas sean variadas, se toma la más alta de 18 mts. Estas dimensiones indican que el auditorio cuenta con un volumen de 8694.56 m³ aproximadamente. Ver figura número 19.

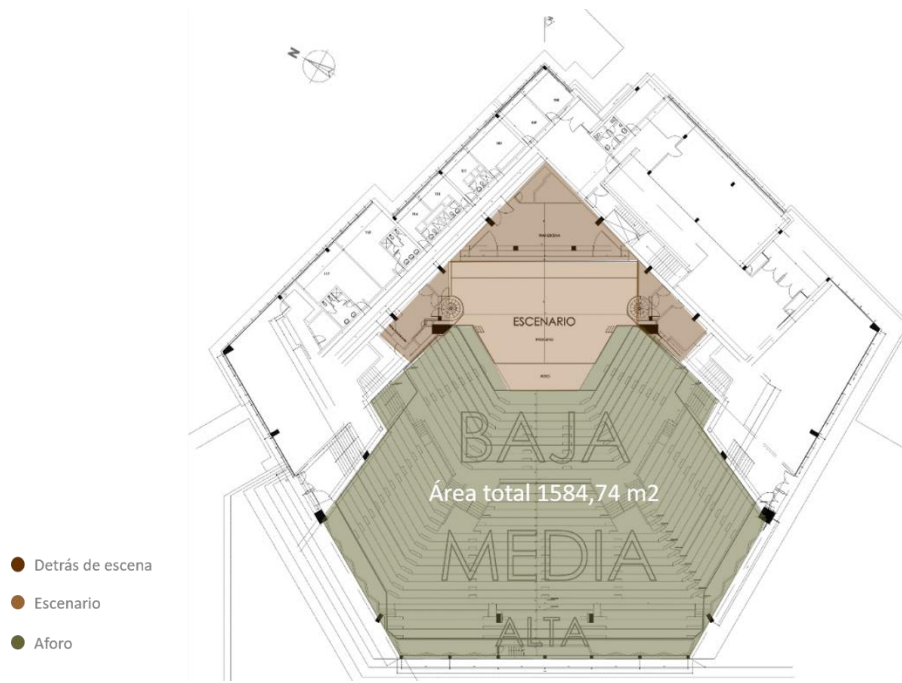


Figura 16 Zonificación y área total

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

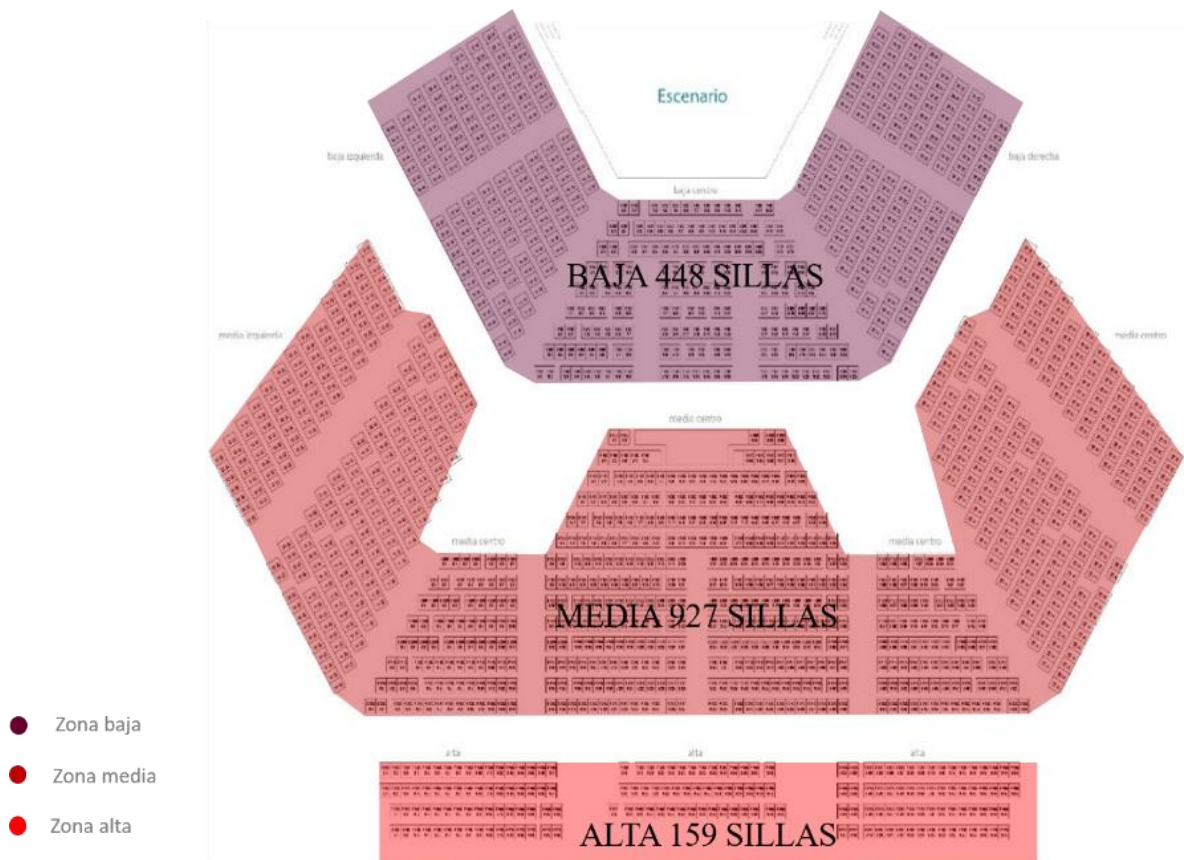


Figura 17 Capacidad de personas

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)



Figura 18 Dimensiones

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

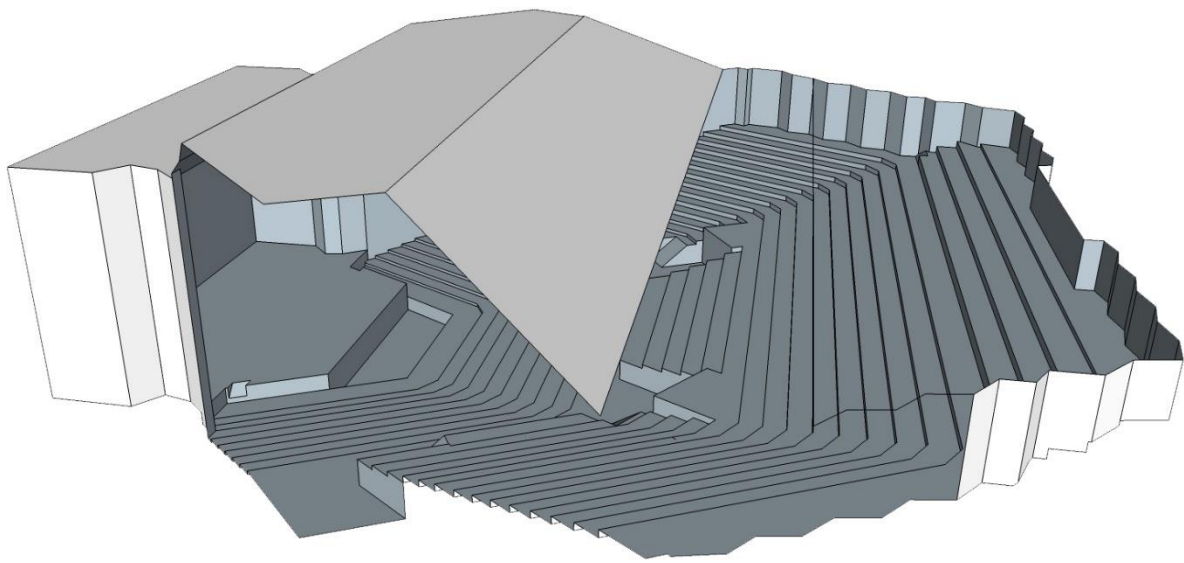


Figura 19 Volumen de la sala del auditorio

Elaboración propia

Dentro de la descripción física de la sala, se realiza una caracterización general de cómo está compuesta la sala estructural y espacialmente. En la figura número 20 se observa cómo se incorporan los elementos estructurales que le dan soporte a todo el volumen de la sala perimetralmente creando un cerramiento que divide la sala privada de todo el auditorio.

Una vez dispuestos los elementos estructurales perimetrales, espacialmente se observan los espacios con los que cuenta el auditorio León de Greiff. Su zonificación se distribuye por el detrás de escena, que cuenta con tres accesos de ingreso y salida para las personas que se van a dirigir al escenario.

Seguido de esto, se encuentra el escenario con el foso y desde el punto en que termina su ubicación, se empiezan a distribuir las circulaciones verticales y horizontales, dejando espacios para ubicar la silletería para la zona baja, la zona media y la zona alta. En la zona media se encuentran 4 accesos para el público y en la zona alta se encuentran dos.

- Elementos estructurales
- Detrás de escena
- Escenario
- Foso
- Aforo
- Accesos al escenario
- Accesos medios a la sala
- Accesos altos a la sala
- Ubicación de la sillería
- Circulaciones verticales
- Circulaciones horizontales

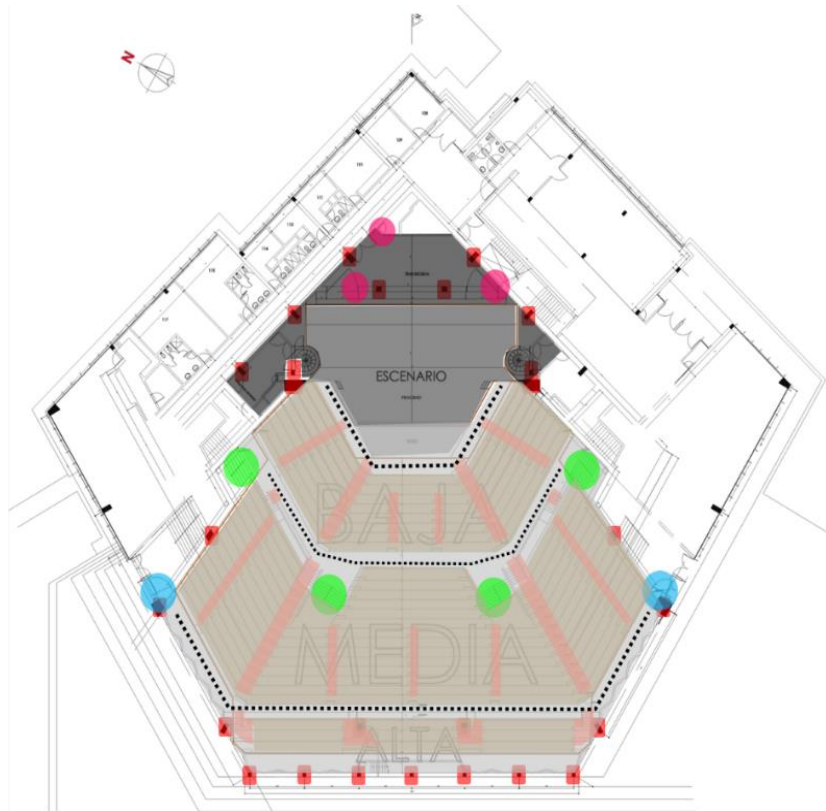


Figura 20 Descripción de la sala

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

6.2 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL AUDITORIO

El auditorio León de Greiff se conforma en planta por una sala que maneja diferentes niveles empezando desde el punto final en donde se encuentra el escenario y el foso hasta la última zona en donde se encuentra el público. Ver figura 21 y 22.

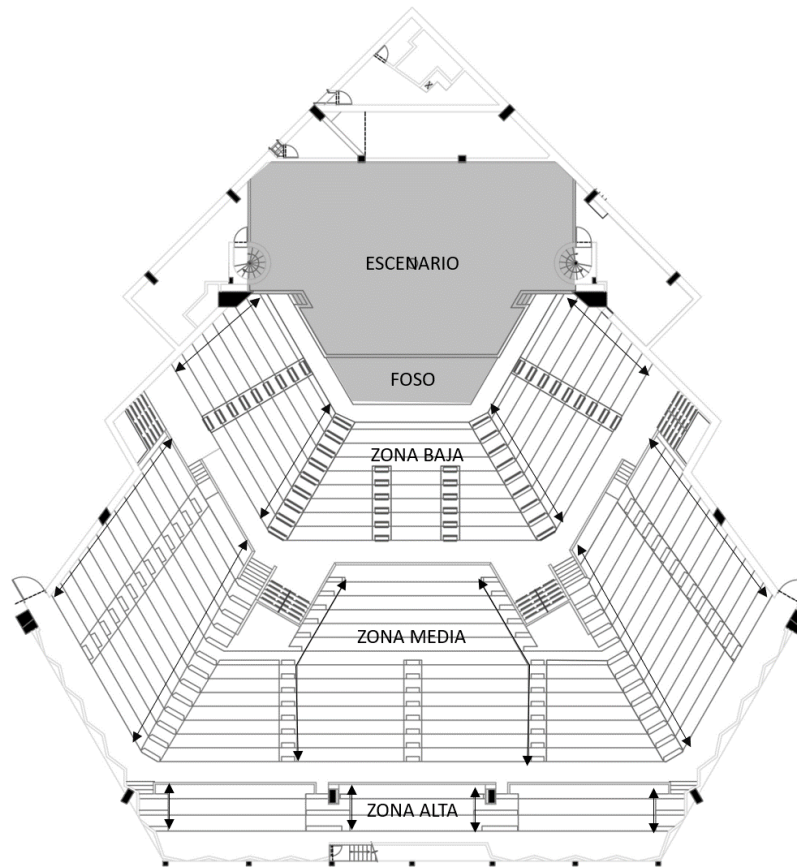


Figura 21 Niveles en planta

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

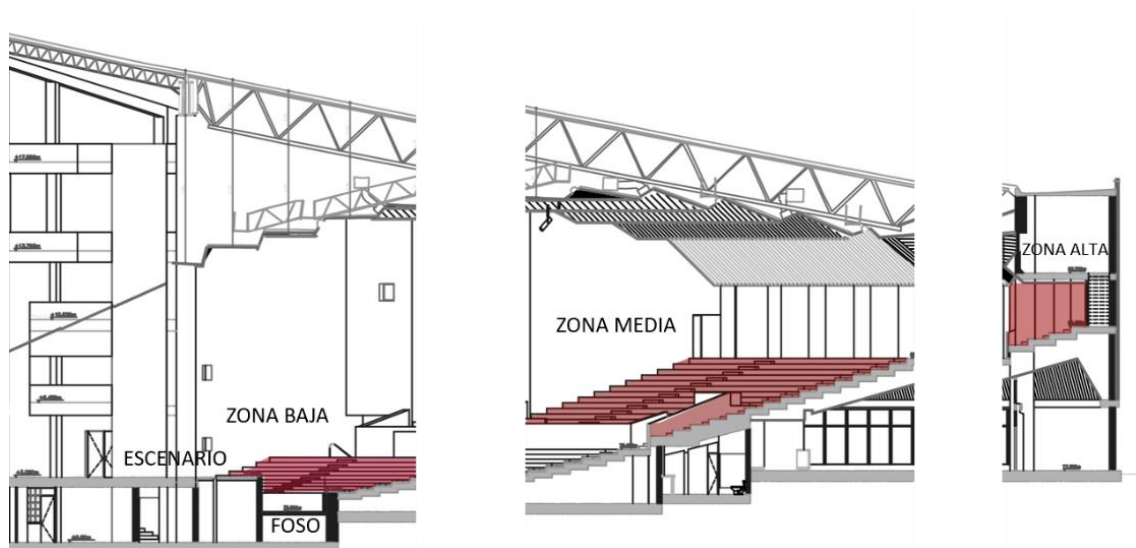


Figura 22 Niveles en corte

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

El escenario tiene dimensiones de 17.00 metros de ancho por 11.00 metros de profundidad y cuenta con un foso de 9.00 metros de ancho por 3.00 metros de profundidad. Ver figura número 23.

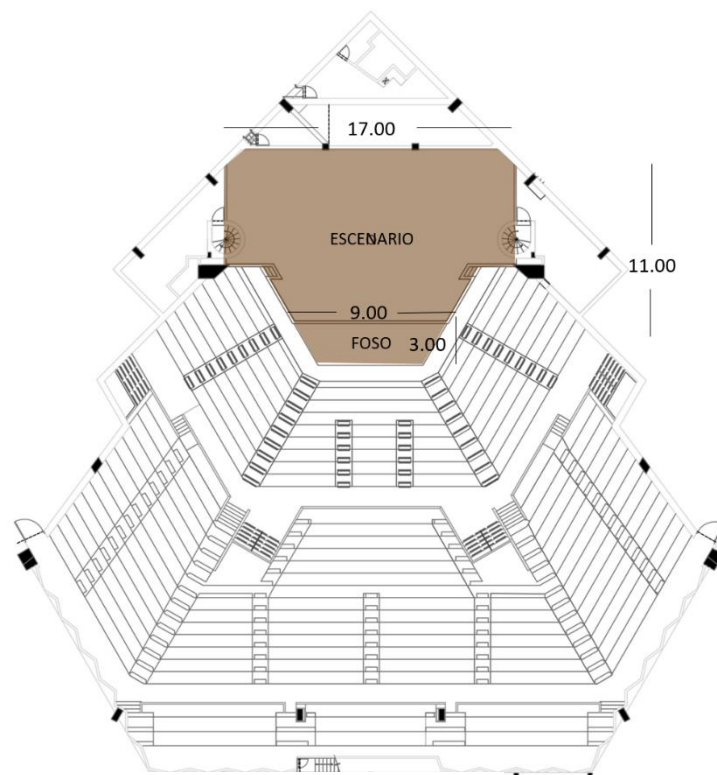


Figura 23 Escenario y foso

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

En el nivel bajo, que es el más cercano al escenario, la altura de los elementos escalonados en donde se ubica el público es de 0.15 cm y el escalonamiento para la circulación del usuario es de 0.08 cm. En el nivel medio, los elementos para ubicar al público cambian su altura a 0.26 cm y sus circulaciones tienen una altura de 0.13 cm. Para el último nivel del auditorio, los elementos para ubicar al público tienen una altura de 0.29 cm y su circulación tiene una altura de 0.14 cm. Ver figura 24, 25, 26.

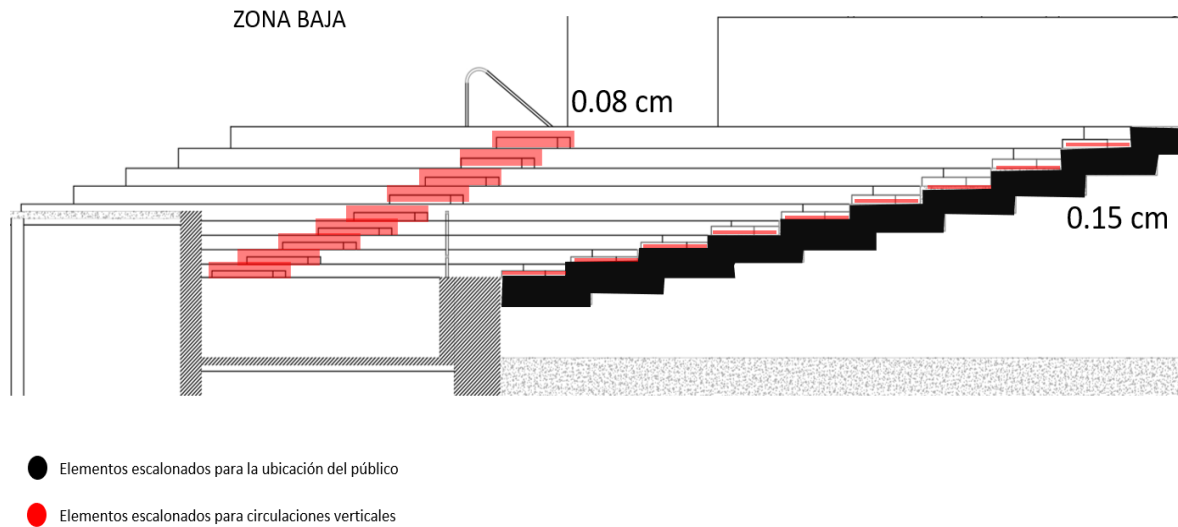


Figura 24 Zona baja
Elaboración propia. Fuente: (Colombia)

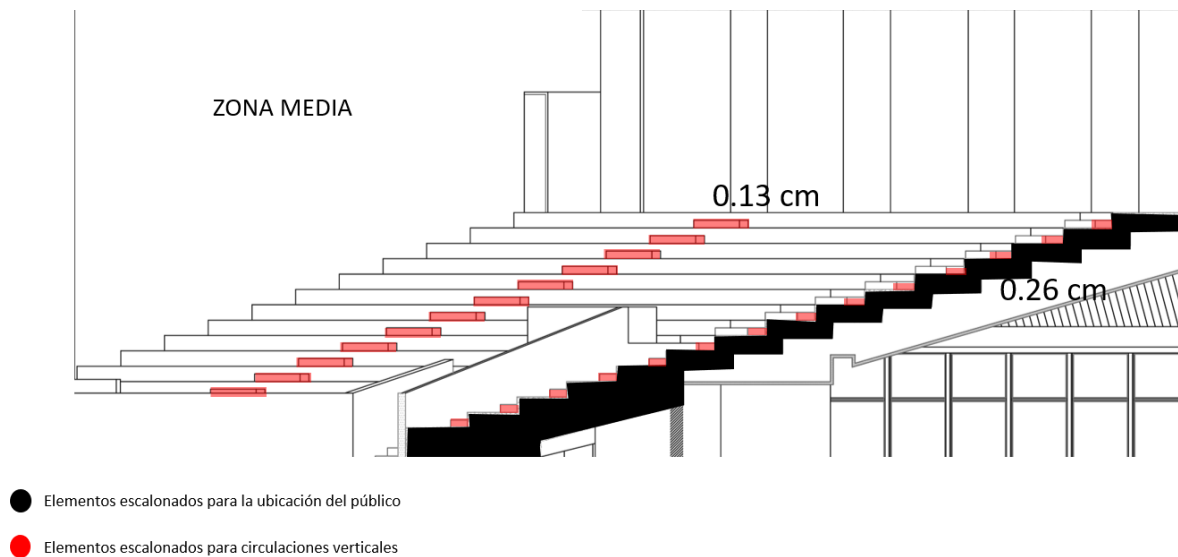


Figura 25 Zona media

Elaboración propia. Fuente: (Colombia)

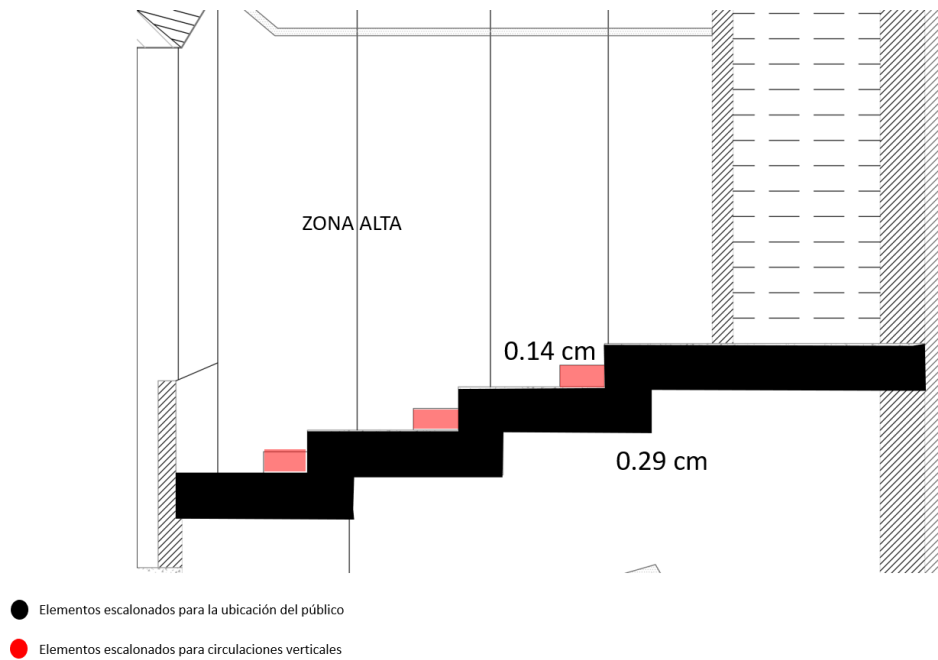


Figura 26 Zona alta

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

La disposición del escalonamiento en la zona baja, media y alta del auditorio, genera en cada una un cerramiento perimetral, conformado por elementos lisos que se abren y al mismo tiempo se cierran hasta llegar al último nivel de la sala. Ver figura 27, 28, 29, 30.

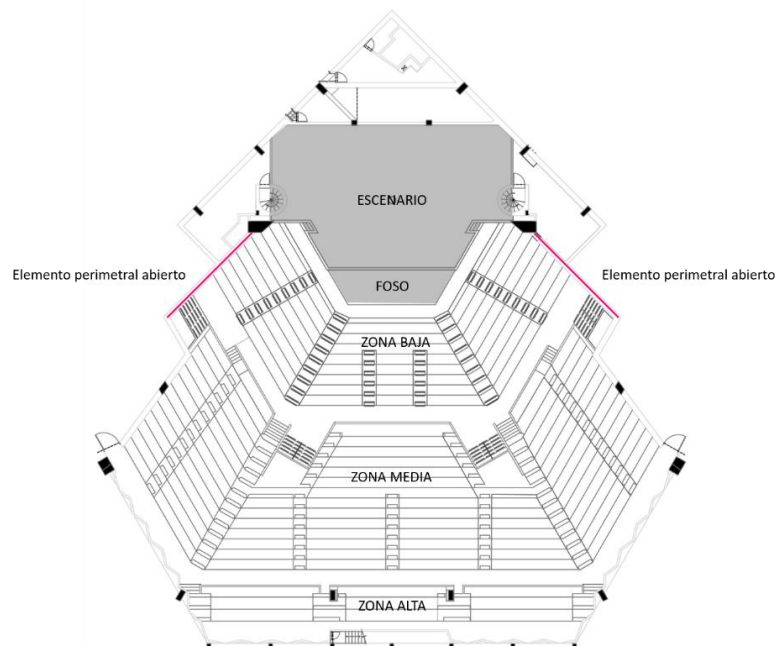


Figura 27 Cerramiento perimetral zona baja

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

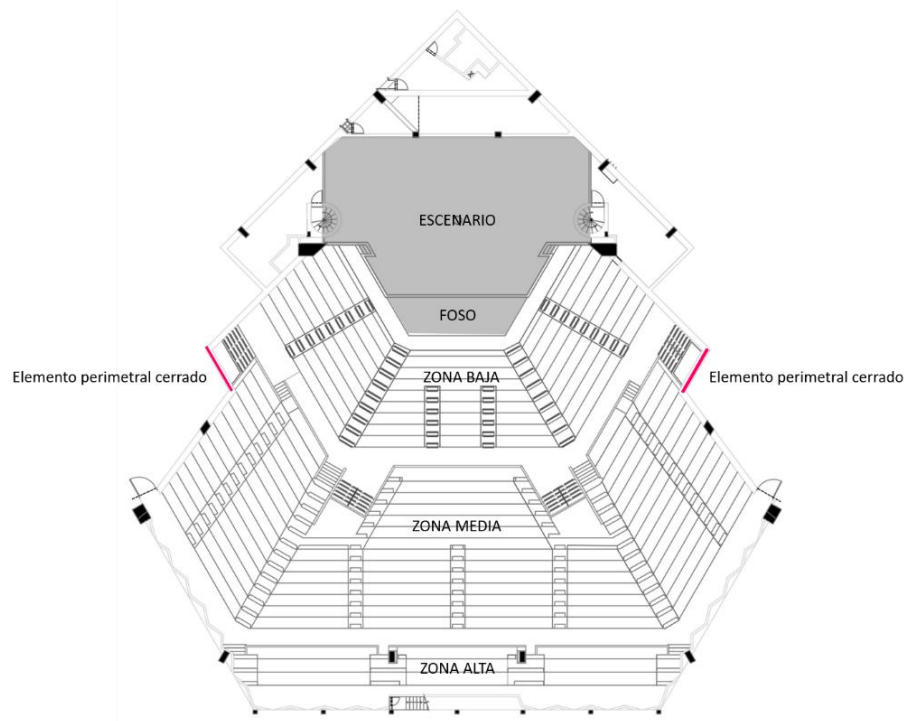


Figura 28 Cerramiento perimetral

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

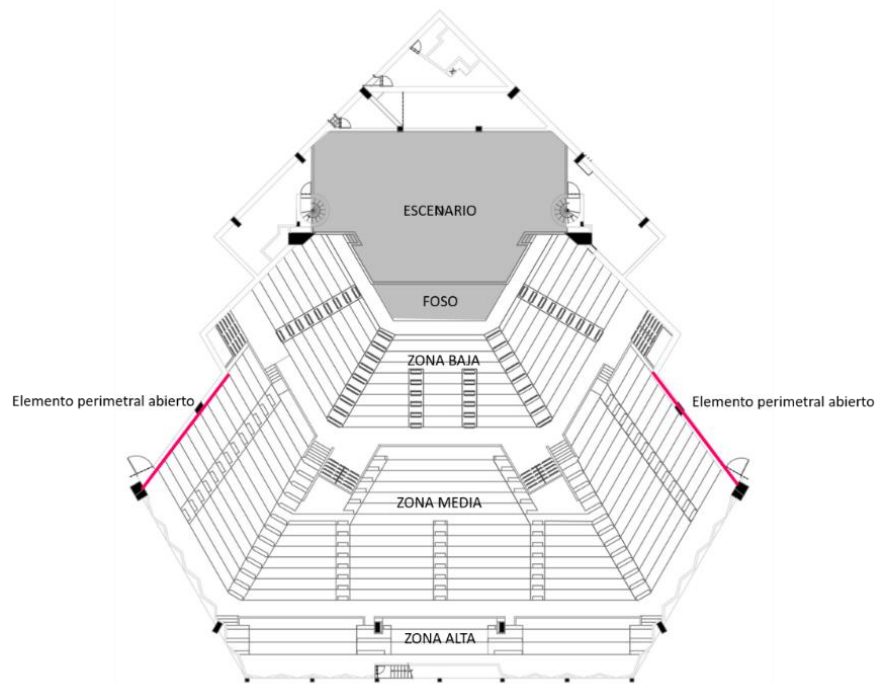


Figura 29 Cerramiento perimetral zona media

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

En el último nivel de la sala, los elementos perimetrales se aumentan, formando un zigzag desde el costado derecho hasta el costado izquierdo.

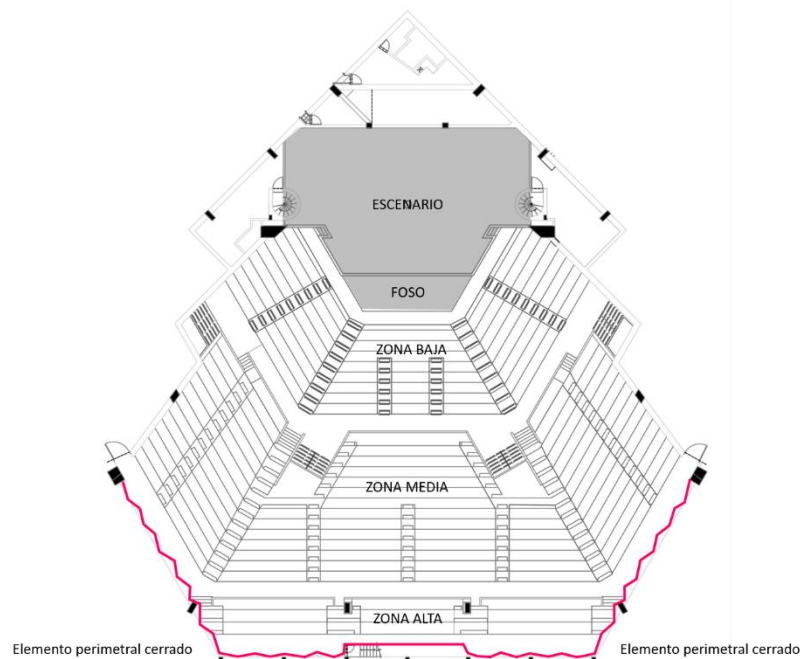


Figura 30 Cerramiento perimetral zona alta

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

Por último, en la figura número 31 se observa un elemento escalonado en forma de caparazón que cierra la pieza por completo. Este elemento se ubica a lo largo de toda la sala, empezando en la zona del escenario como una pendiente y permite conectar los elementos que manejan una direccionalidad con el escalonamiento de la silletería, manipulando alturas variables de 12.00 metros desde la zona del escenario hasta 4.5 metros en la última zona de la sala.

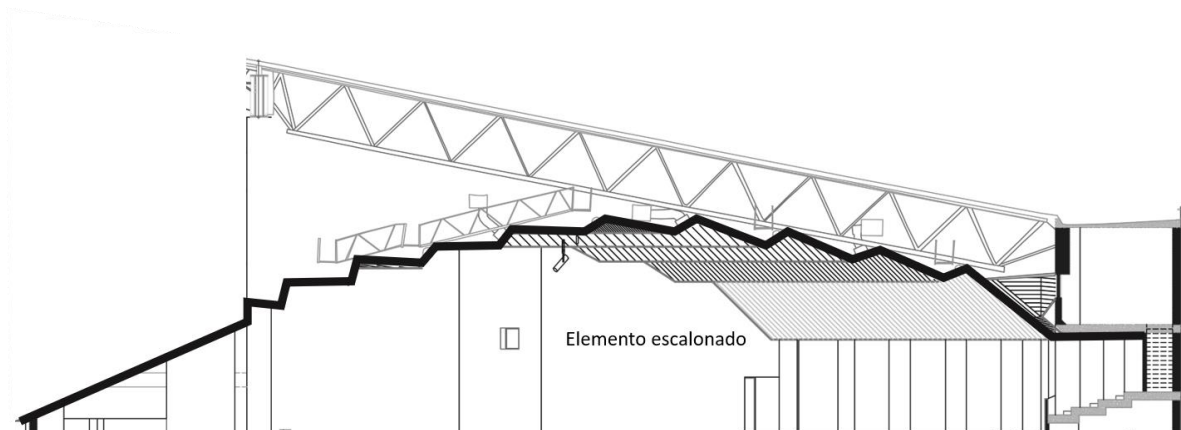


Figura 31 Cerramiento de la pieza

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

6.3 ENTENDIENDO EL COMPORTAMIENTO DE LOS RAYOS SONOROS EN LA GEOMETRÍA

“La vista aísla mientras que el sonido incluye; la vista es direccional mientras que el sonido es omnidireccional. El sentido de la vista implica exterioridad, pero el sonido crea una sensación de interioridad. Contemplo un objeto, pero el sonido me llega; el ojo alcanza, pero el oído recibe”. (Pallasmaa, 2014, pág. 59)

Teniendo en cuenta el concepto que se desarrolló en el marco teórico sobre el comportamiento del sonido analizado a partir de un trazado de rayos sonoros y la descripción geométrica de la sala, se realiza el análisis de la siguiente manera.

En la figura número 32 en el centro del escenario se instala una fuente que emite muchas ondas sonoras, para comprender mejor el comportamiento del sonido dentro de la forma geométrica, solo se toma el primer sonido incidente y su primera reflexión. De acuerdo a esto, en el costado derecho de la sala en la zona baja, el sonido incidente choca con el elemento perimetral y su reflexión al ser perpendicular con el incidente, toma una dirección hacia la zona de atrás de la zona de audiencia. Sucesivamente se realiza este trazado en diferentes puntos de ese costado, evidenciando que el elemento perimetral que se abre en la zona baja no deja que el sonido se devuelva a la zona en donde se emite. Esto quiere decir que en esa zona el comportamiento del sonido no es el más adecuado para los oyentes. Sin embargo, el elemento perimetral que cierra ese costado, ayuda a que la onda incidente y reflejada refuerce el comportamiento del sonido en esa zona.

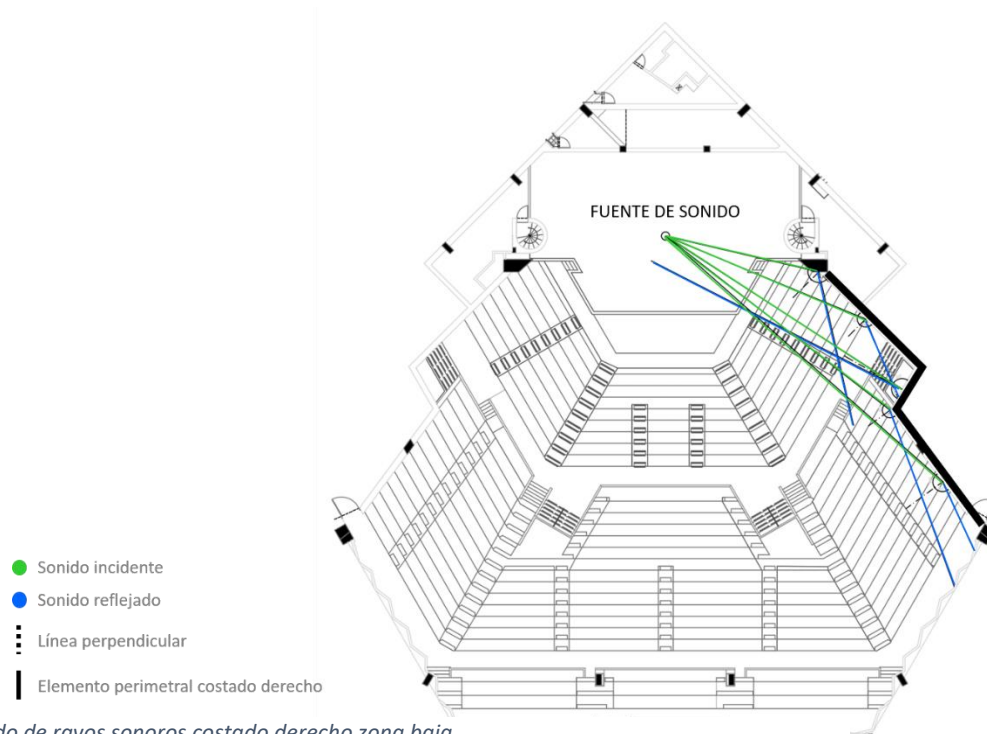


Figura 32 Trazado de rayos sonoros costado derecho zona baja

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

Simultáneamente se desarrolló en cada costado y cada zona de la sala el trazado de rayos para mirar el comportamiento del sonido en la forma geométrica de toda la sala.

En la figura número 33 se realizó el trazo de rayos desde la fuente ubicada en el escenario hacia el costado derecho de la zona de atrás, el comportamiento del sonido incidente y el sonido reflejado en esta zona es más adecuado ya que la perpendicular hace que el sonido reflejado se devuelva hacia el escenario, reforzando esa zona de audiencia. En esta zona trasera el elemento lateral presenta un movimiento en forma de zigzag y esto genera más movimiento para que el comportamiento del sonido incidente y reflejado sea más adecuado.

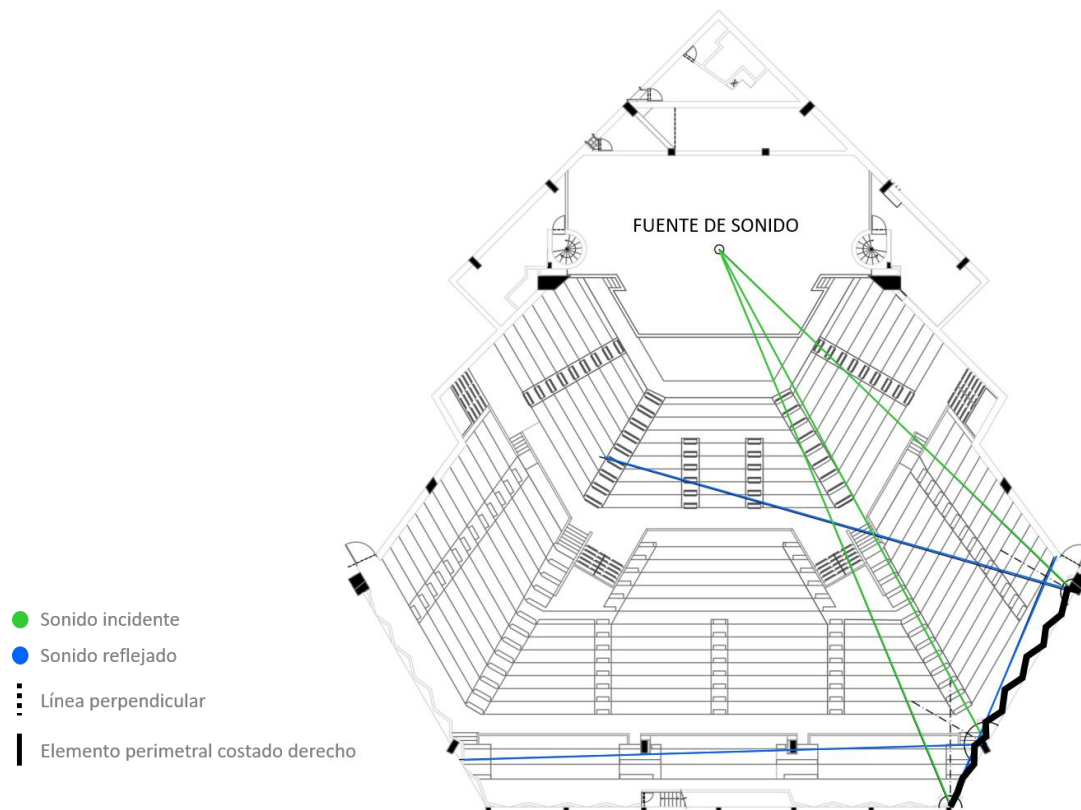


Figura 33 Trazado de rayos sonoros del costado derecho en la zona de atrás

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

En la figura número 34 el trazado de rayos para el costado central de la zona de atrás, el comportamiento del sonido incidente y el sonido reflejado es bueno, en esta zona el elemento lateral mantiene el movimiento en forma de zigzag permitiendo que el sonido incidente tenga más movimiento y el sonido reflejado mejor propagación en esta zona central de la sala.

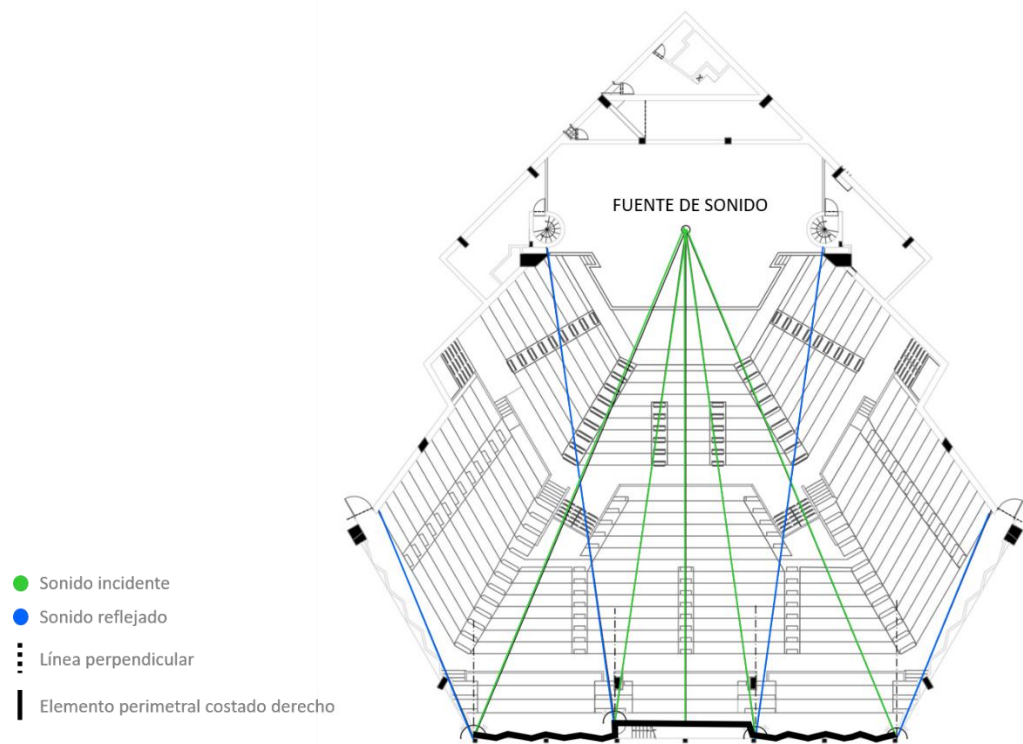


Figura 34 Trazado de rayos sonoros costado central zona de atrás

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

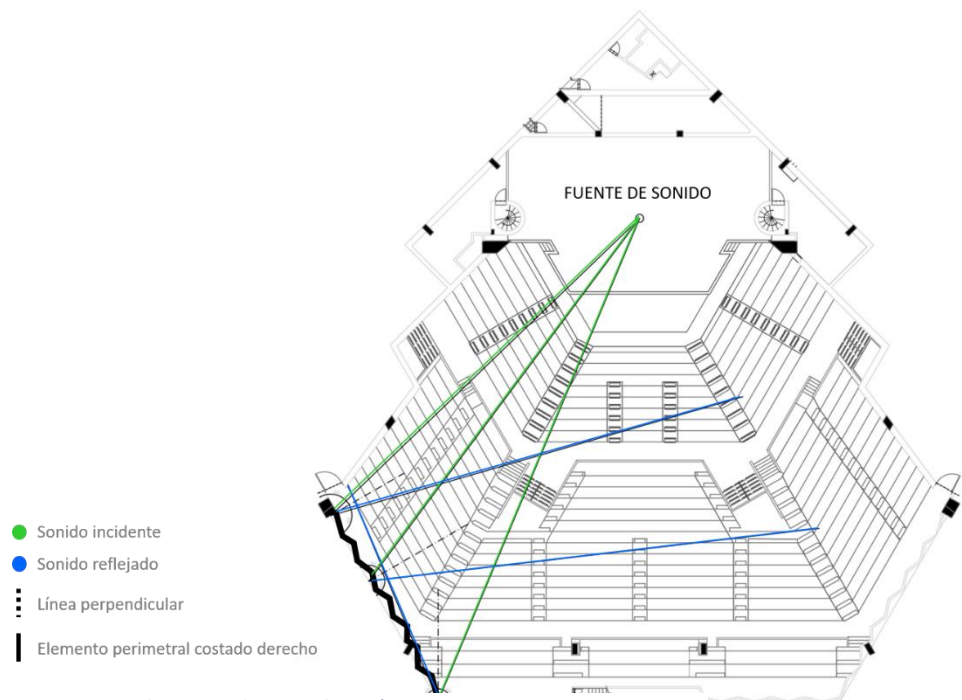


Figura 35 Trazado de rayos sonoros costado izquierdo zona de atrás

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

La conformación de la forma geométrica de la sala, al llegar al costado izquierdo en la zona de atrás, ver figura número 35 evidencia que la sala es simétrica y el procedimiento del análisis del trazado de rayos, cumple con el mismo comportamiento que en el costado derecho de la sala. Esto quiere decir, que en el costado izquierdo en la zona de atrás, el elemento en forma de zigzag que empieza a cerrar la sala, sigue creando el movimiento para que el sonido incidente y el sonido reflejado tenga un mejor comportamiento.

En la figura número 36 se observa que el elemento perimetral del costado izquierdo cierra la forma geométrica de la sala porque vuelve a llegar al punto en donde empieza el escenario. En este costado el comportamiento del trazado de rayos es igual al del costado derecho resaltando que el elemento perimetral más adecuado para el comportamiento del sonido incidente y reflejado es el del medio porque cierra la sala y deja que el sonido incidente se refleje en la misma dirección reforzando sonoramente esa zona de audiencia.

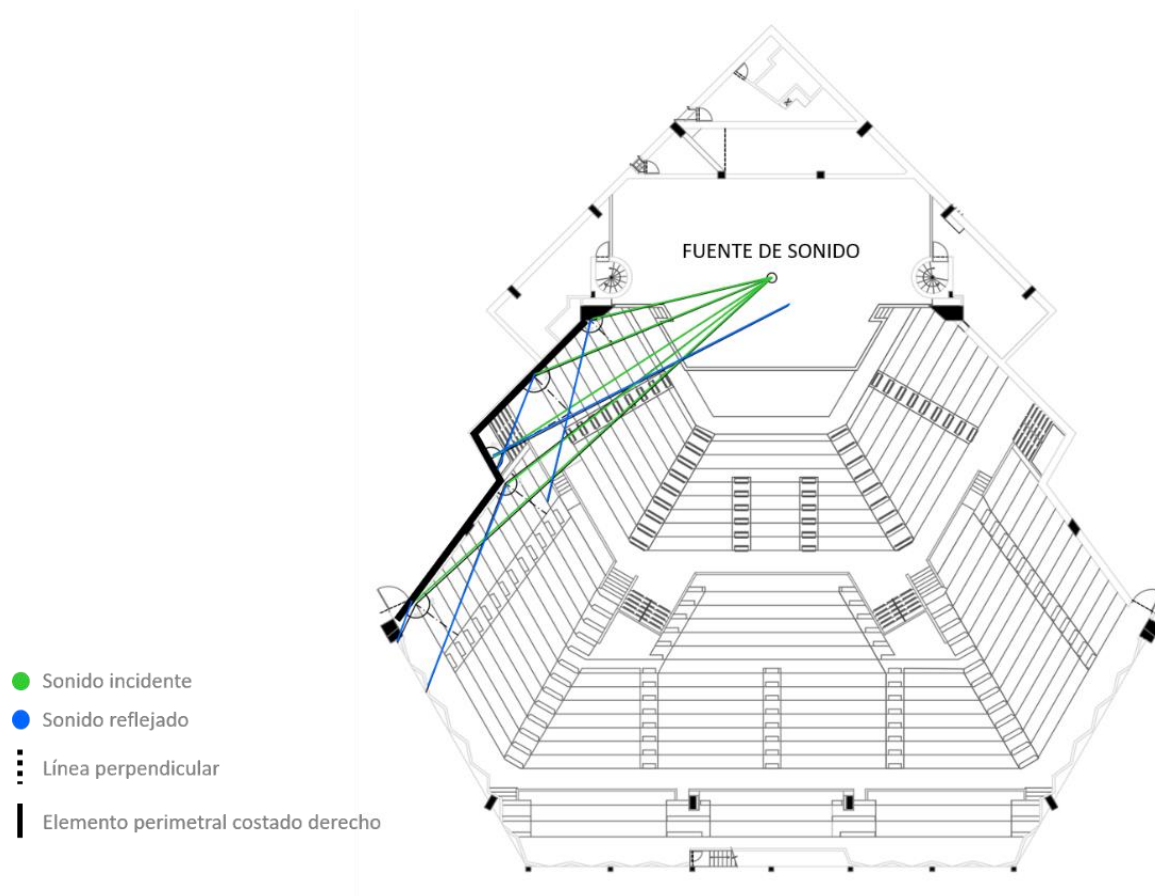


Figura 36 Trazado de rayos sonoros costado izquierdo zona de atrás

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

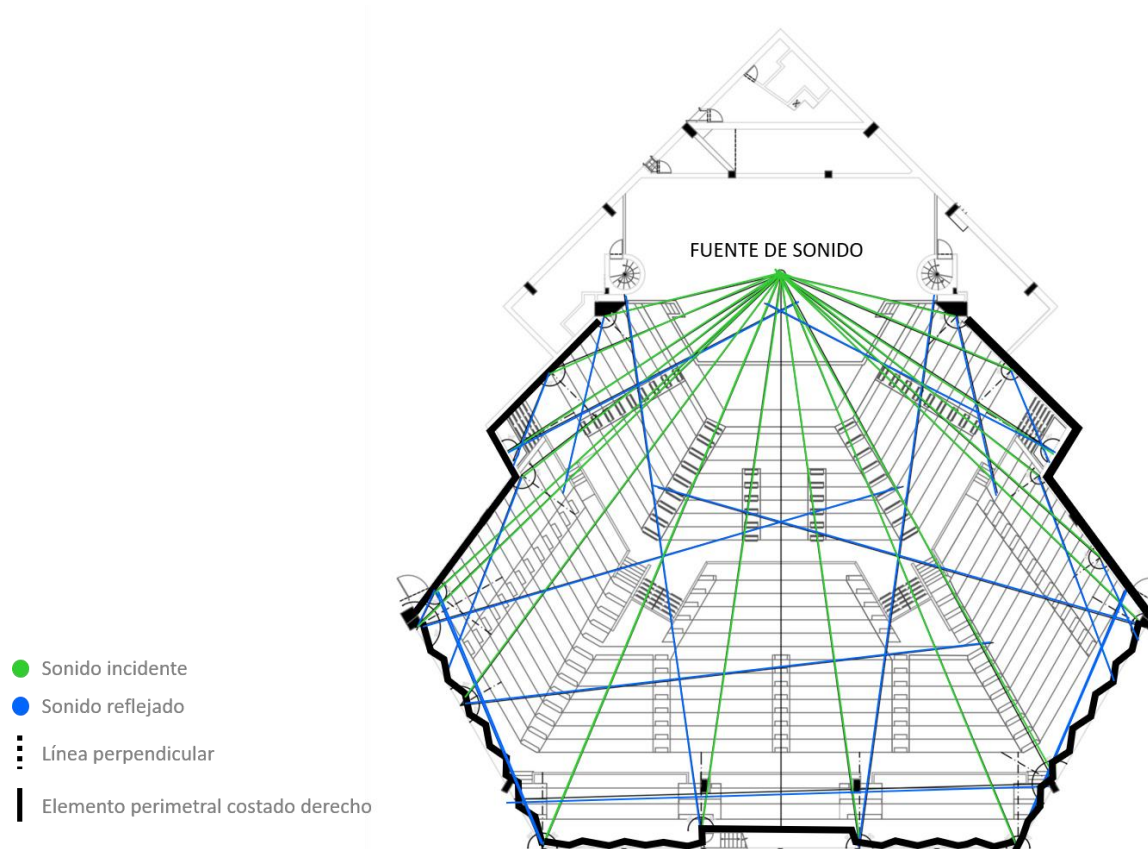


Figura 37 Trazado de rayos sonoros de la sala completa

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

Posteriormente, se muestra en la figura número 37 el trazado de rayos de la sala completa, para evidenciar en su totalidad la simetría que existe de la forma geométrica y como esta genera una simetría en el trazo de los rayos para evidenciar el comportamiento del sonido incidente y reflejado. Además de esto se muestra completa para evidenciar que los elementos perimetrales que ayudan más a que la sala tenga un adecuado comportamiento del sonido son los que se encuentran en la zona media y en la zona de atrás cerrando la sala.

Conjuntamente se desarrolla el mismo análisis, con un plano en corte, para mostrar el comportamiento del sonido con el elemento escalonado que se ubica en la parte superior de la sala como cerramiento final del objeto.

En la figura número 38 se muestra que la fuente sonora ubicada verticalmente en el escenario, emite el sonido incidente que choca con el elemento escalonado en la parte superior y su reflexión permite que el sonido se propague mejor verticalmente para toda la sala.

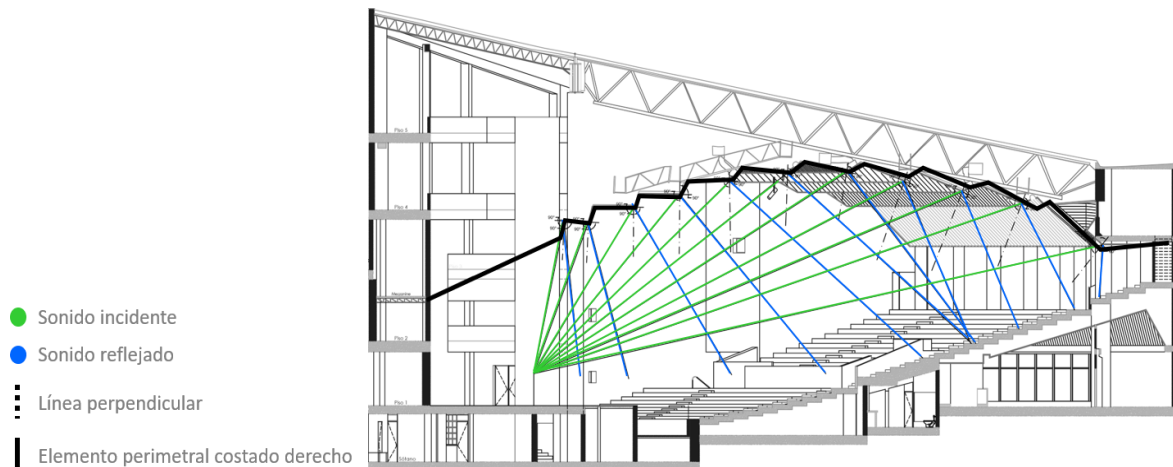


Figura 38 Trazado de rayos sonoros en corte

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

Desarrollar el análisis del trazado de rayos evidencia el porqué de la conformación de la forma geométrica de la sala, concluyendo que los elementos perimetrales más adecuados para que el comportamiento del sonido sea más adecuado son los que cierran la sala en la zona media y en la zona de atrás más el elemento ubicado en la parte superior, mientras que los elementos perimetrales con abertura se adecuan para que se cumpla la capacidad mínima de personas. Permitiendo un complemento de unos con otros para comprender la totalidad de la forma geométrica.

6.4 ENTENDIENDO EL COMPORTAMIENTO VISUAL

El escenario es una de las zonas más importante para las salas, ya que el objetivo de estas proyecciones arquitectónicas es exhibir actividades para el ocio del ser humano. Es por esto, que se realizó un análisis de rayos visuales para exponer como la zona del escenario se dispone para generar adecuadas visuales hacia la zona del público y de igual manera como las personas que se ubican en el aforo visualizan desde la zona más baja hasta la zona más alta el escenario.

En la figura número 39 se observa que para que la zona de audiencia tenga una adecuada visión al escenario, este crea unas márgenes que delimitan el espacio de uso para que la puesta en escena no se pierda hacia el espectador. De igual manera, el margen de delimitación que se crea en el escenario garantiza que la persona que se ubique en él, también tenga una visualización total de la zona de audiencia.

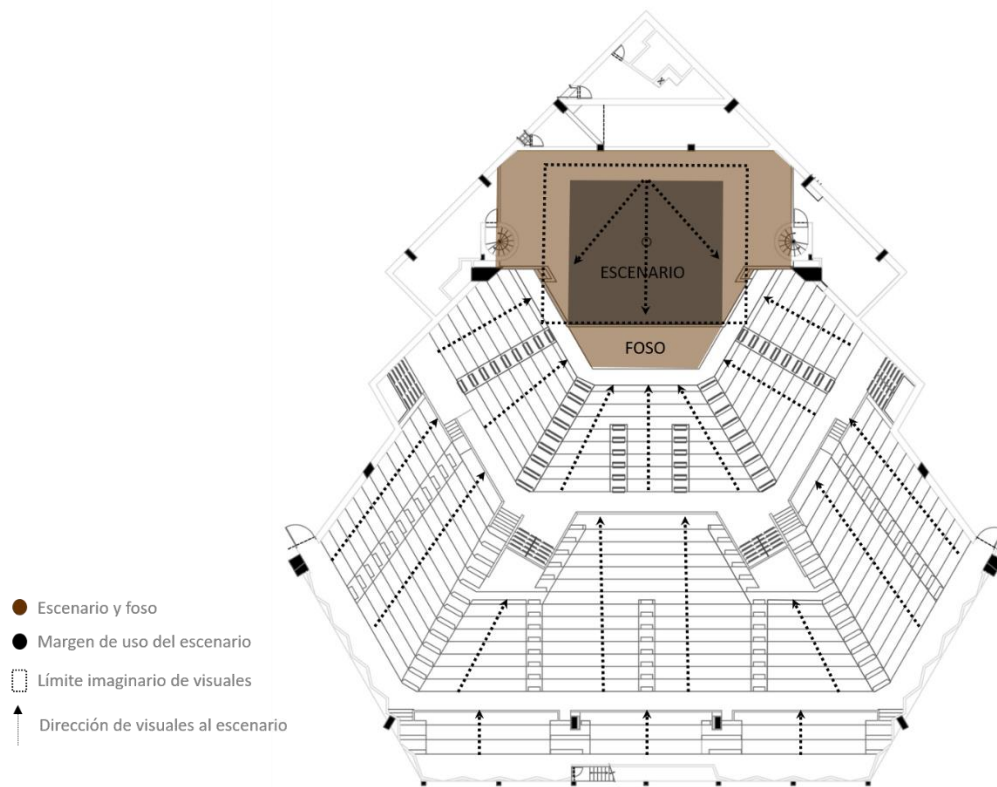


Figura 39 Visualizaciones en planta

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

Además de esto, también se visualiza que los elementos perimetrales al tener estas aberturas que se abren y se cierran crean una direccionalidad para el usuario. Por un lado, los elementos que están ubicados en el costado derecho, ver figura número 40 dirigen el posicionamiento de la persona hacia el costado derecho del escenario, igual pasa con los elementos ubicados en el costado izquierdo, ver figura número 41 generan un posicionamiento de la persona hacia el costado izquierdo del escenario. Estos elementos al crear ese posicionamiento en los costados laterales, ver figura número 42 crea en el centro, un radio completo de visualización para todos los costados.

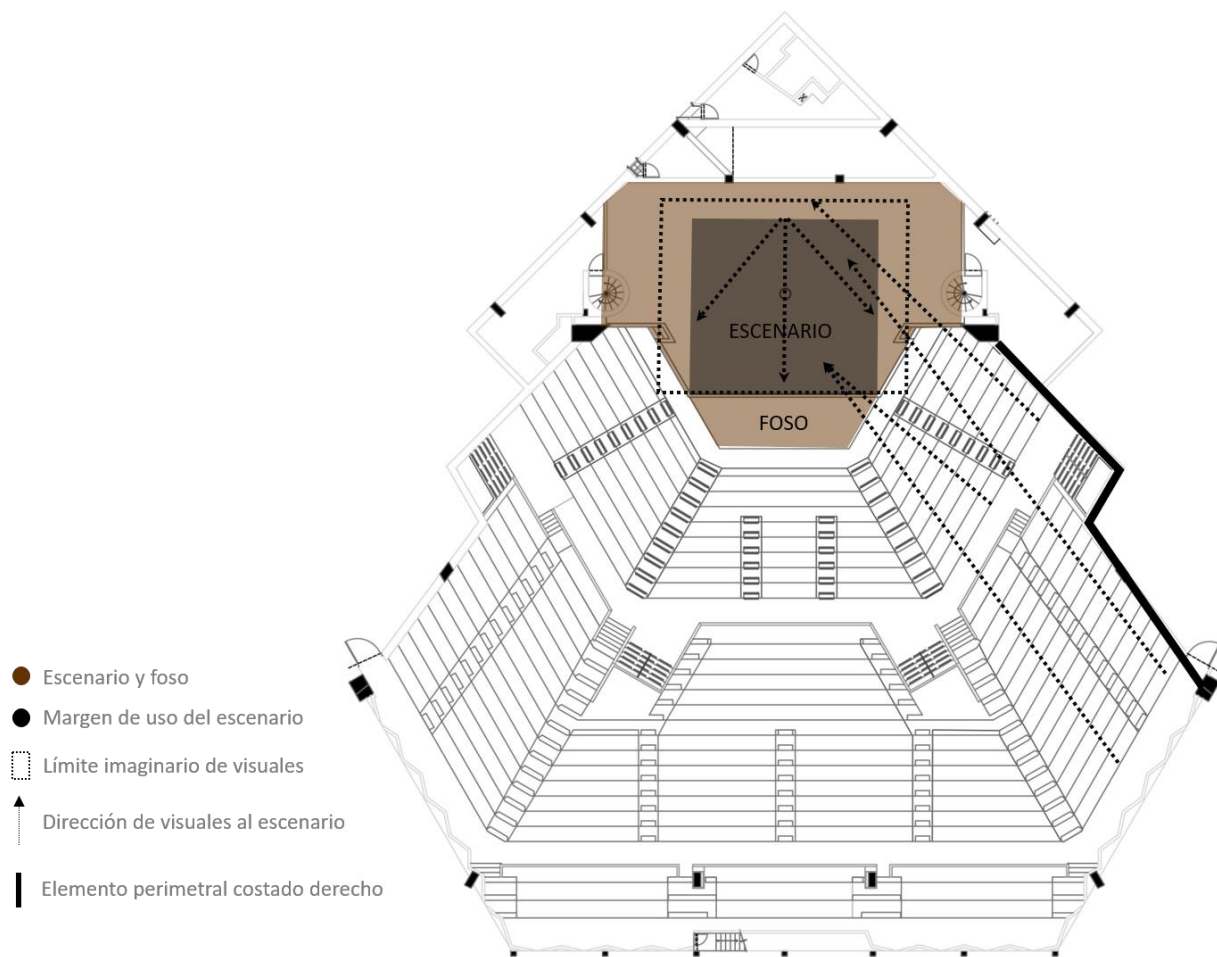


Figura 40 Visualizaciones costado derecho

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

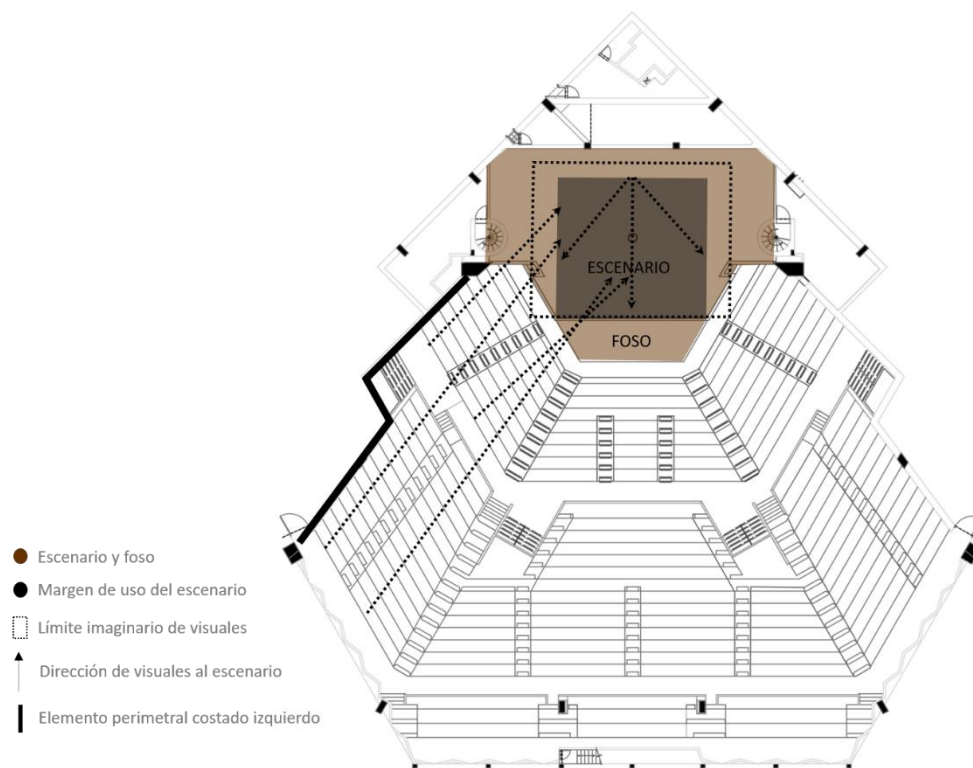


Figura 41 Visualizaciones costado izquierdo

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

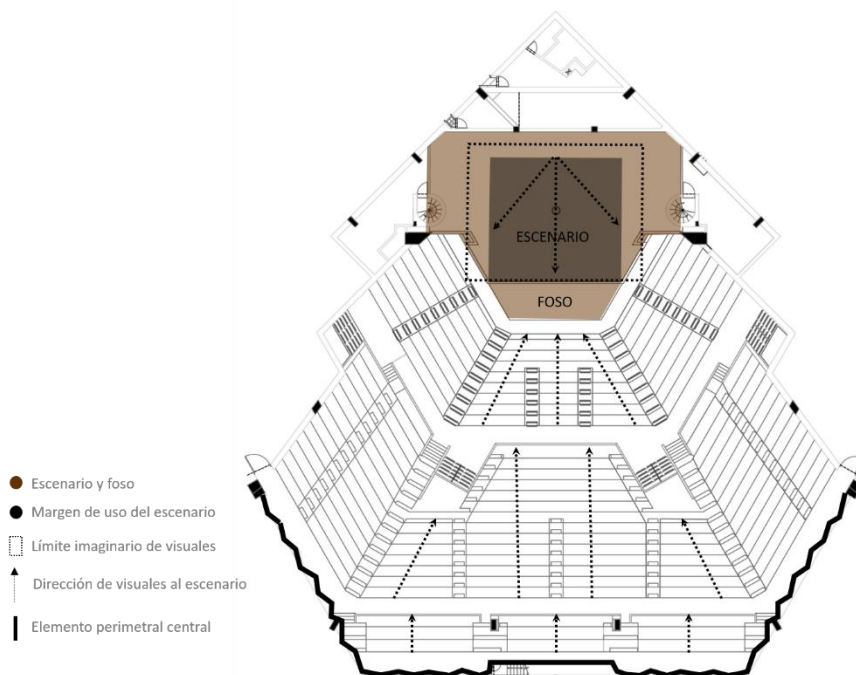


Figura 42 Visuales centrales

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

Las visualizaciones en cuanto al posicionamiento de la silletería ver figura número 43 con las que cuenta la sala, se ubican intercaladas en algunas partes de la zona baja y media, pero en su totalidad la silletería se encuentra ubicada una detrás de otra en toda la sala. Ver figura número 44.

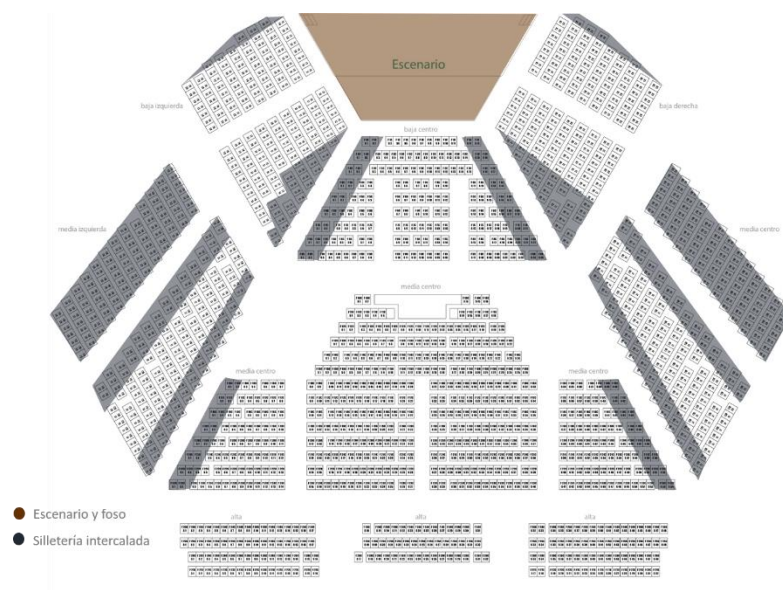


Figura 43 Posicionamiento intercalado de la silletería

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

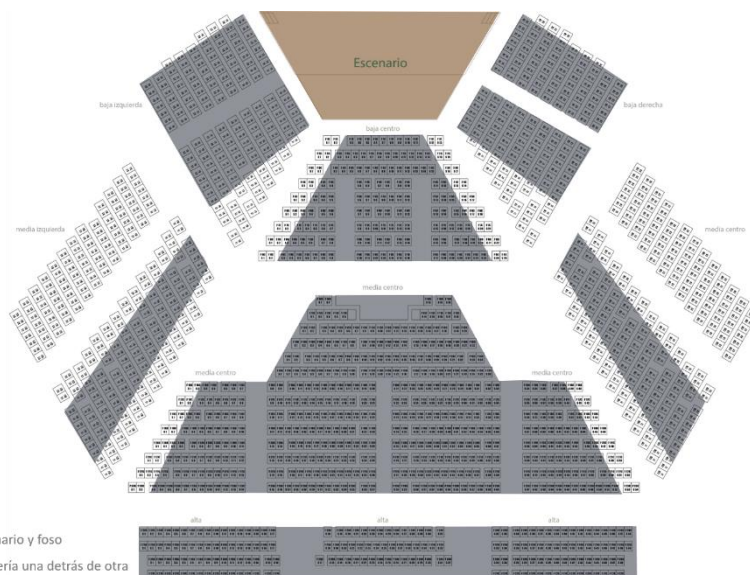


Figura 44 Posicionamiento una detrás de otra de la silletería

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

El análisis de rayos visuales demuestra en corte la línea visual que la persona del público tiene hacia el escenario. Esto se realizó trazando la línea visual desde el punto final del escenario hacia cada escalonamiento de la zona baja, media y alta. La línea visual llega a una línea que se traza verticalmente de 1.10 metros desde el escalonamiento y esto permite ver que su comportamiento garantiza que al manejar una distancia entre cada escalonamiento las líneas visuales pasan por encima de cada observador. Ver figuras número 45, 46, 47.

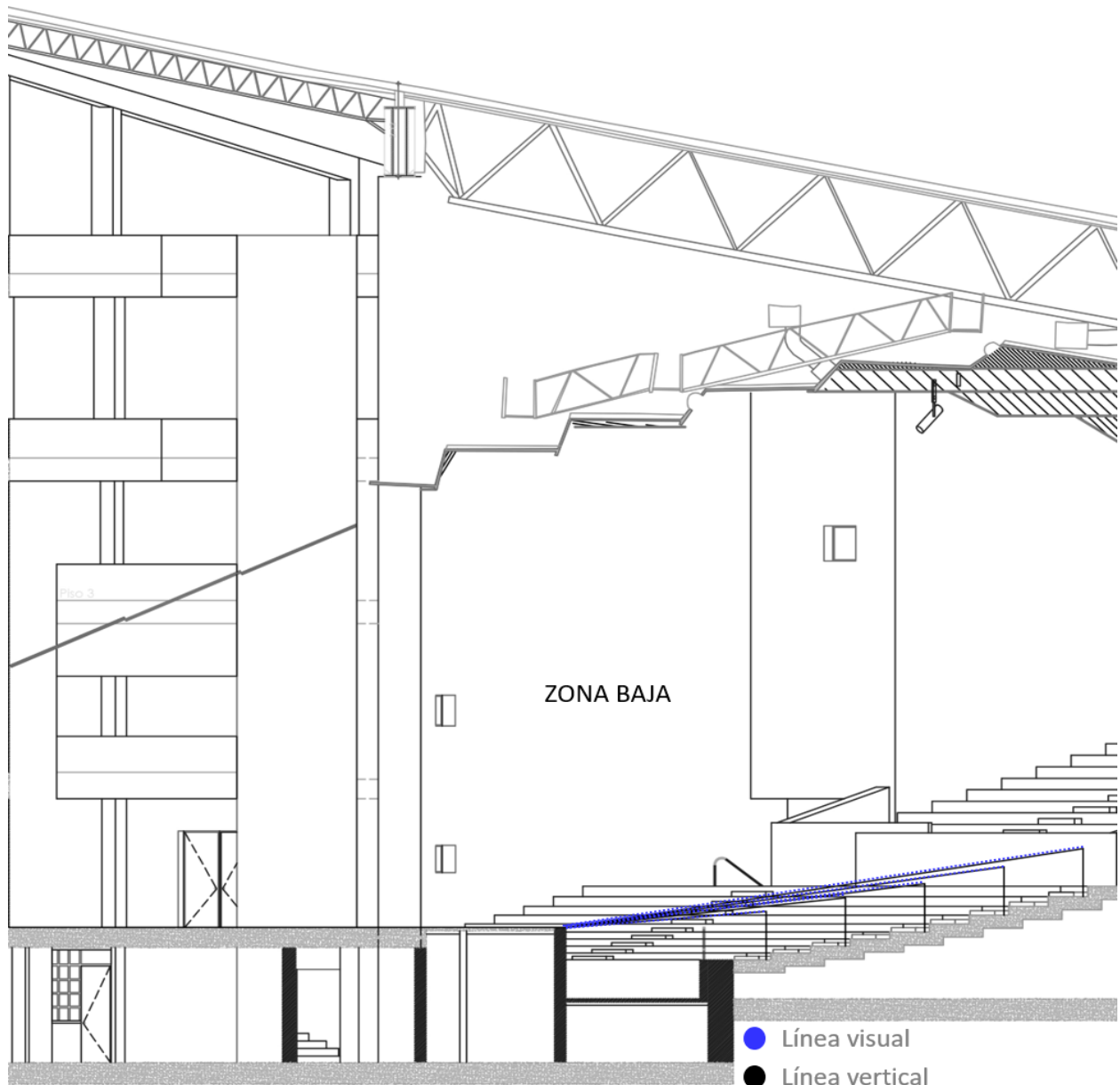


Figura 45 Entendiendo las visuales en la zona baja

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

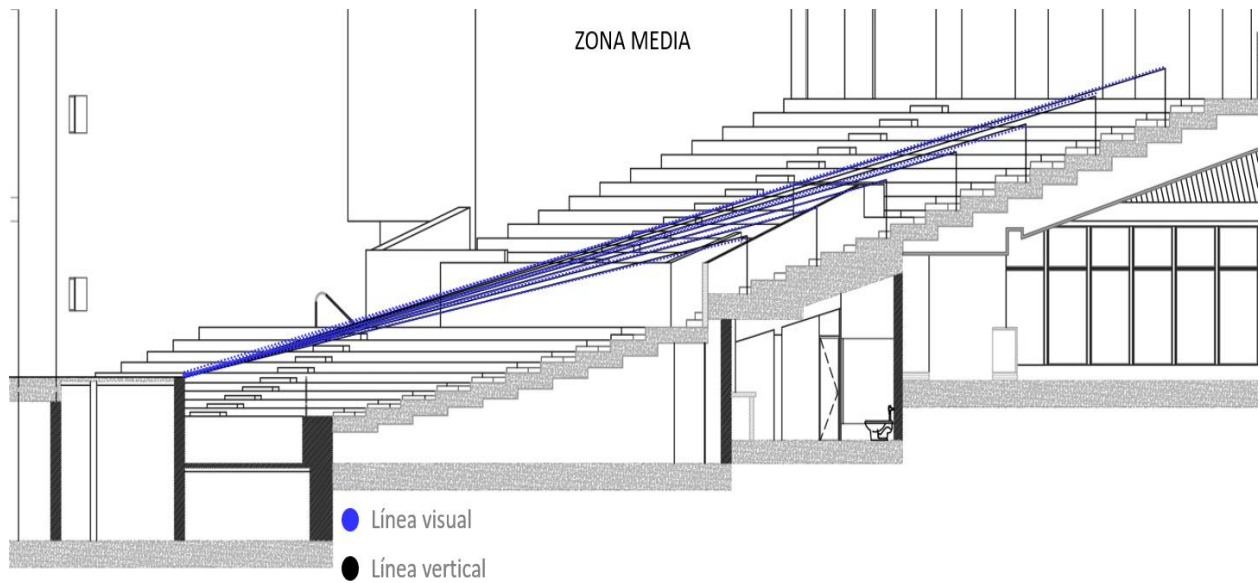


Figura 46 Entendiendo las visuales en la zona media

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

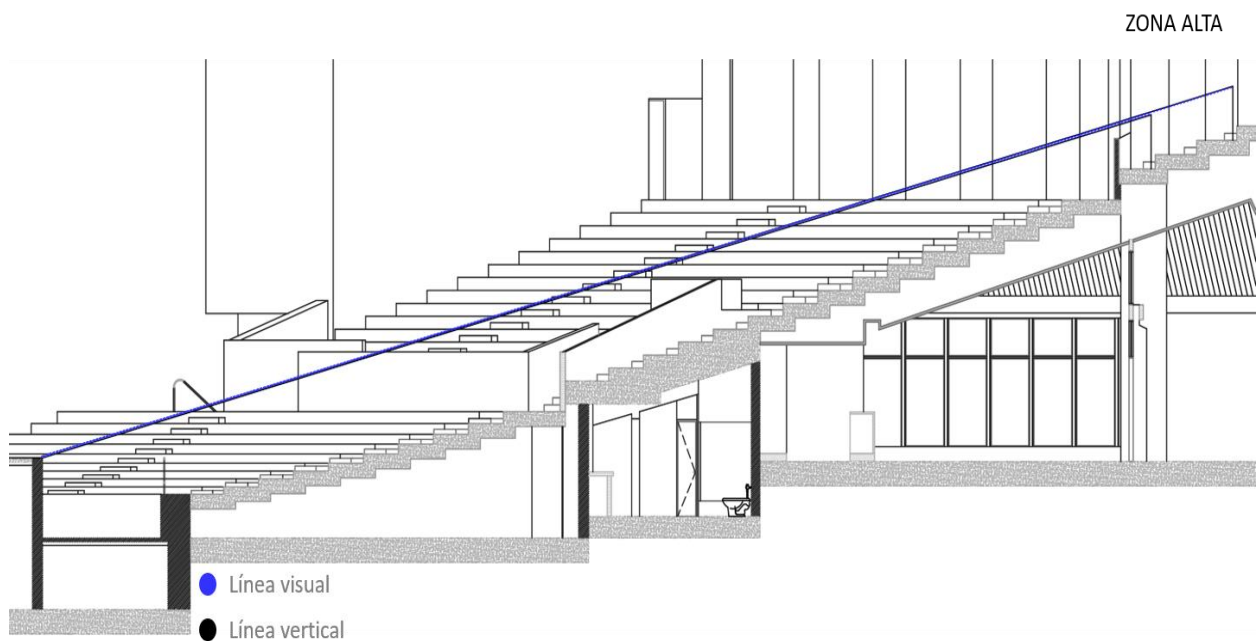


Figura 47 Entendiendo las visuales en la zona alta

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

6.5 DESCRIPCIÓN DE LA MATERIALIDAD DEL AUDITORIO

“La materialidad de la arquitectura es al mismo tiempo una fuente de sensaciones y emociones diversas, algunas de las cuales son de orden práctico y otras de orden afectivo y estético”. (Roa, 2002, pág. 192)

Las características de la materialidad con la que cuenta el auditorio se dividen en dos partes, el material que construye la forma y el revestimiento del material que acompaña la forma. Sus particularidades se determinan de la siguiente manera:

El material que construye la forma es a base de concreto pintado, este permite ser la estructura portante de los elementos escalonados en planta y los elementos perimetrales que conforman la pieza. En la figura 48 se observa que la construcción de la sala ocupa un 100% de este material.

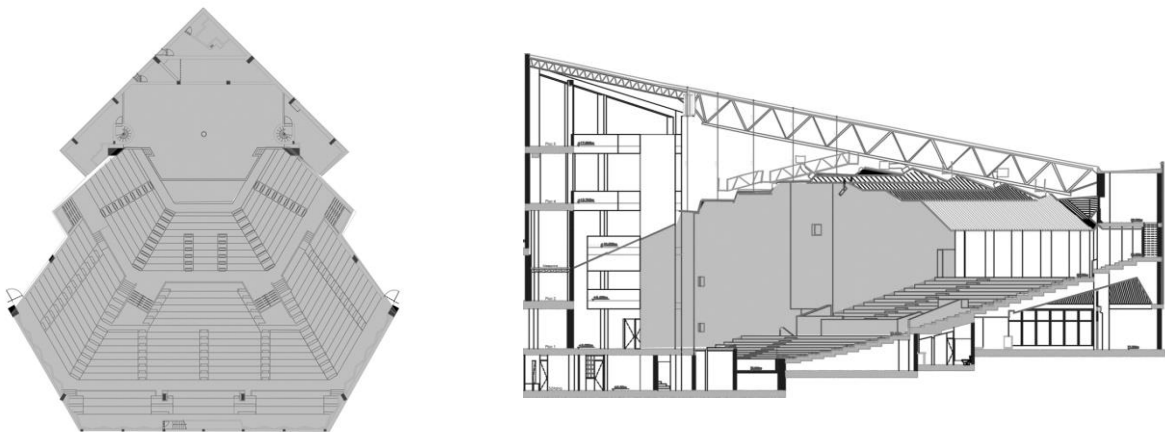


Figura 48 Material estructural portante

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

El concreto para el auditorio León de Greiff fue indispensable en su proceso constructivo, sin embargo, el revestimiento de los materiales que acompañan la forma caracteriza mejor al auditorio, ya que al contener actividades que requieren de sonido, sus materiales deben identificarse dentro los materiales acústicos que ayudan a que el sonido tenga un mejor comportamiento dentro de la sala. Es por esto, que el revestimiento de materiales se determina de la siguiente manera:

Una vez construida la estructura portante en concreto, en la figura 49 se indica el espacio en donde está ubicado el escenario y el foso, evidenciando un revestimiento en madera como acabado final.

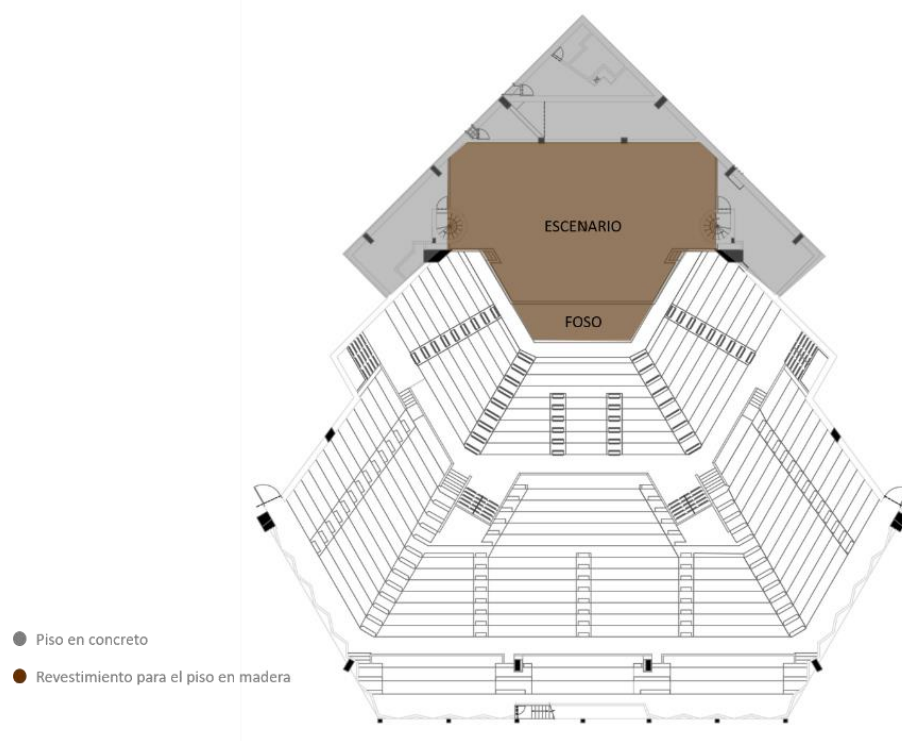


Figura 49 Materialidad escenario y foso

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)



Figura 50 Escenario, Aditorio León de Greiff

Elaboración propia

Después del escenario y el foso, se encuentran los elementos escalonados que se dividen en un espacio para ubicar al público manteniendo el material de concreto dándole un acabado en esmalte liso. Los otros elementos escalonados en su división cumplen la función para que el usuario circule vertical y horizontalmente. Estos elementos si son revestidos por una lámina delgada en linóleo con apariencia lisa. Ver figura 51.

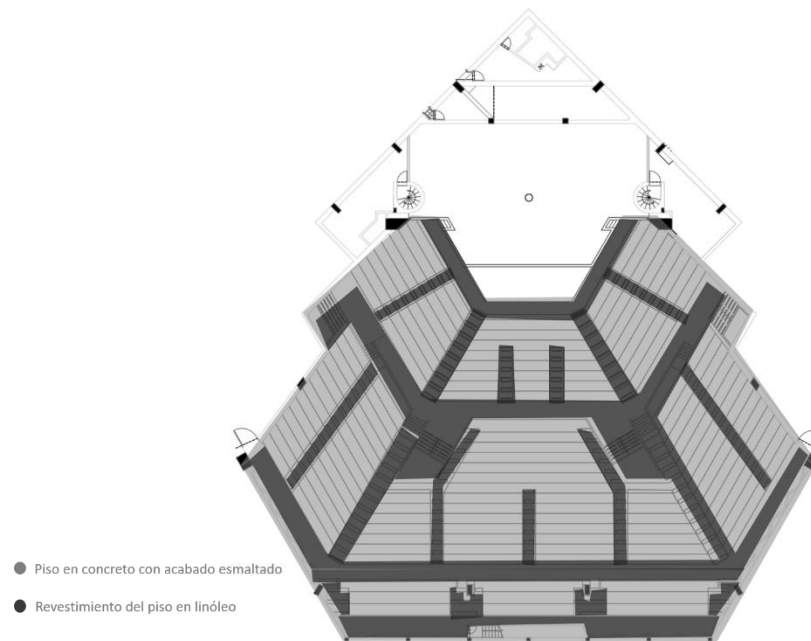


Figura 51 Materialidad zona de audiencia

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)



Figura 52 Revestimiento de piso para zona de audiencia, Auditorio León de Greiff

Elaboración propia

Finalmente, se introduce en la zona del aforo asientos reclinables de espuma en el espaldar y en el asiento con tapizado en paño color rojo. Ver figura 53.

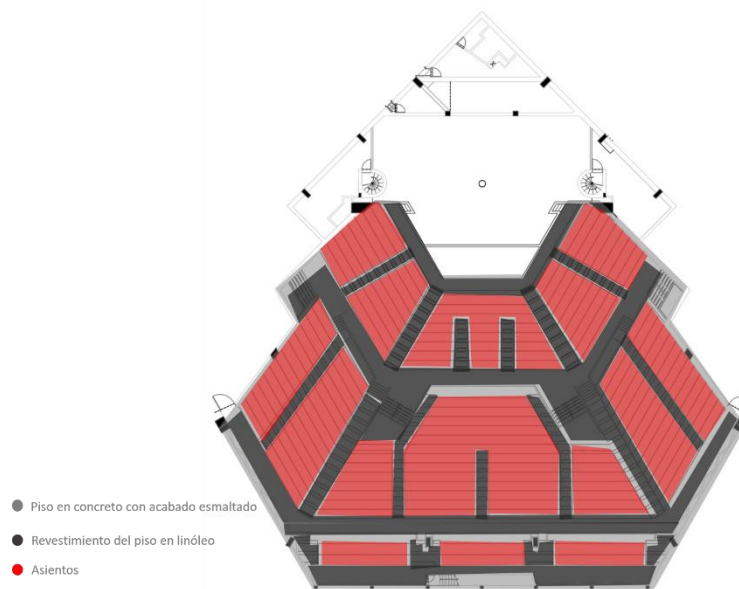


Figura 53 Asientos para el aforo

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)



Figura 54 Silletería zona de audiencia, Auditorio León de Greiff

Elaboración propia

En la figura número 55 se señalan los accesos con los que cuenta el auditorio. En la zona media de la sala se encuentran cuatro accesos y sus puertas fueron elaboradas en madera maciza de 3.00mts de ancho y 2.00mts de altura, con abertura doble hoja y marco perimetral de 4cm de espesor alrededor del vano. En cuanto a las puertas de los accesos de la zona alta, se encuentran dos y fueron elaboradas en madera contrachapada entamborada de 1.00mts de ancho con 2.00mts de altura y 5.00 cm de espesor con marco perimetral alrededor del vano.

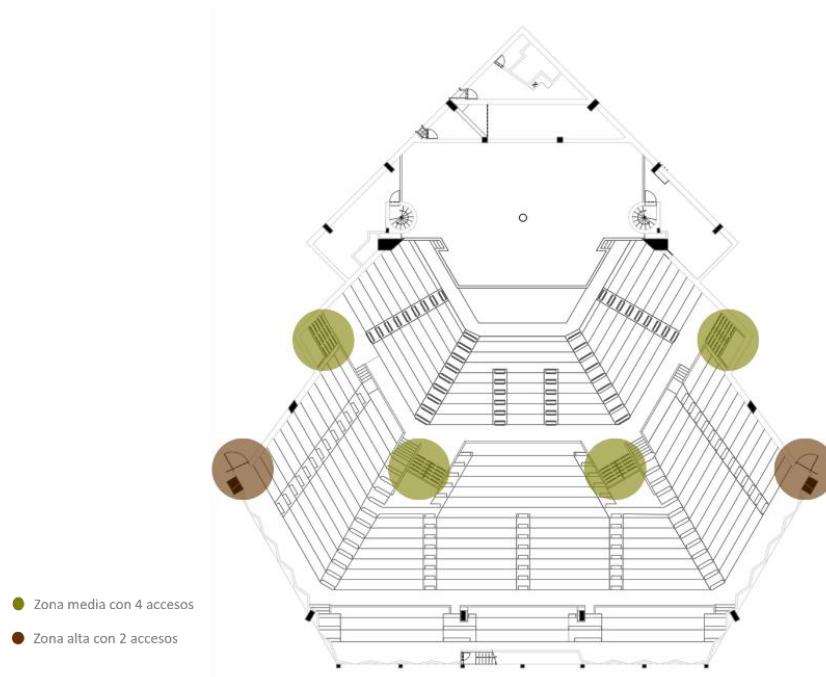


Figura 55 Accesos a la sala

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

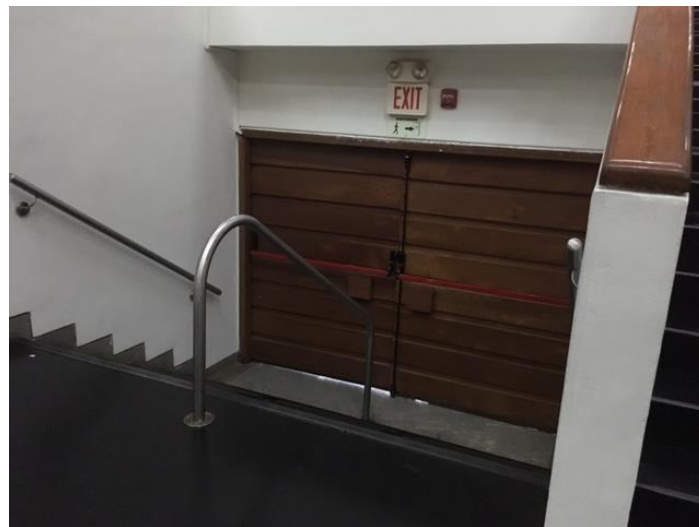


Figura 56 Accesos, Auditorio León de Greiff

Elaboración propia

En cuanto a los elementos perimetrales que están a base de concreto pintado, tal y como se visualiza en la figura número 57 en la zona del escenario, los muros están completamente revestidos en paneles de madera.

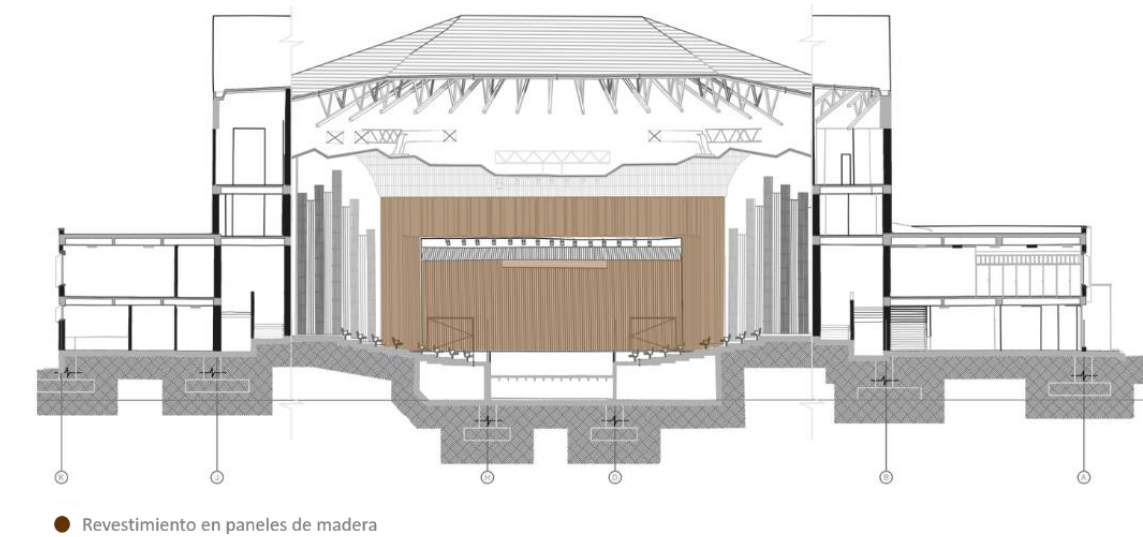


Figura 57 Revestimiento en paneles de madera

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)



Figura 58 Revestimiento muros de escenario, Auditorio León de Greiff

Elaboracion propia

En la zona baja y media estos cuentan con un revestimiento intercalado entre paneles de madera y listones de madera. Los paneles de madera tienen una dimensión de 0.60 cm de ancho manejando rangos distintos entre 6.00 y 9.00 metros de altura en cada panel. Y en cuanto a los listones de madera, cada uno se ubica a cada 6.00 cm entre sí, manejando una proporción de 4.00 cm de ancho con un espesor de 5.00 cm y sus alturas se encuentran variadas entre los 7.00 a los 10.00 metros. Ver figura número 59.

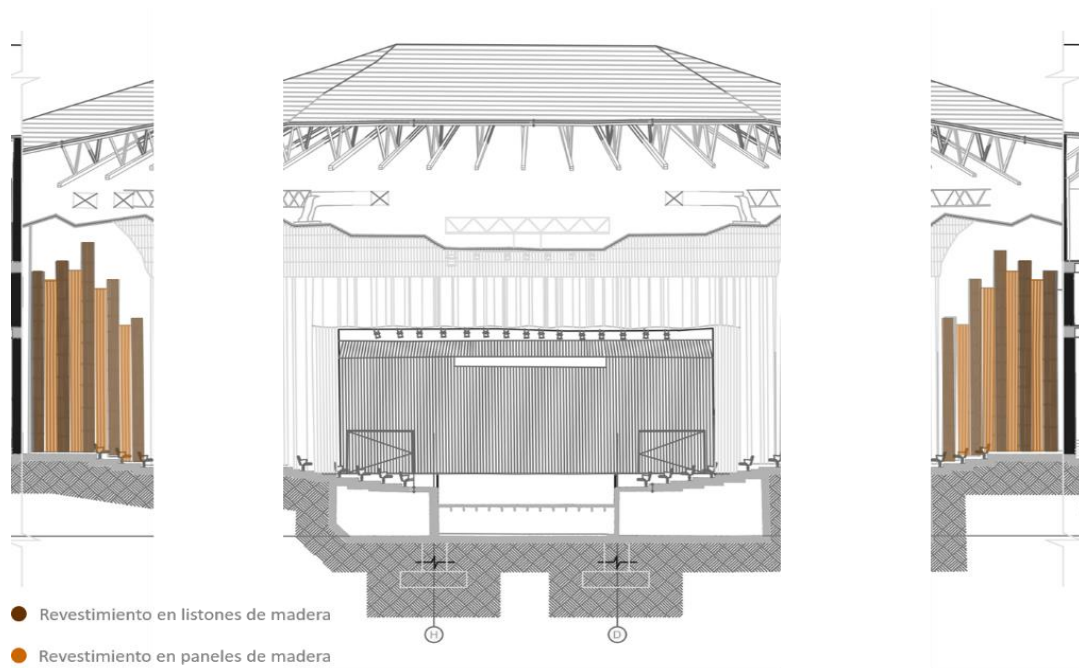


Figura 59 Revestimiento material zona media

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

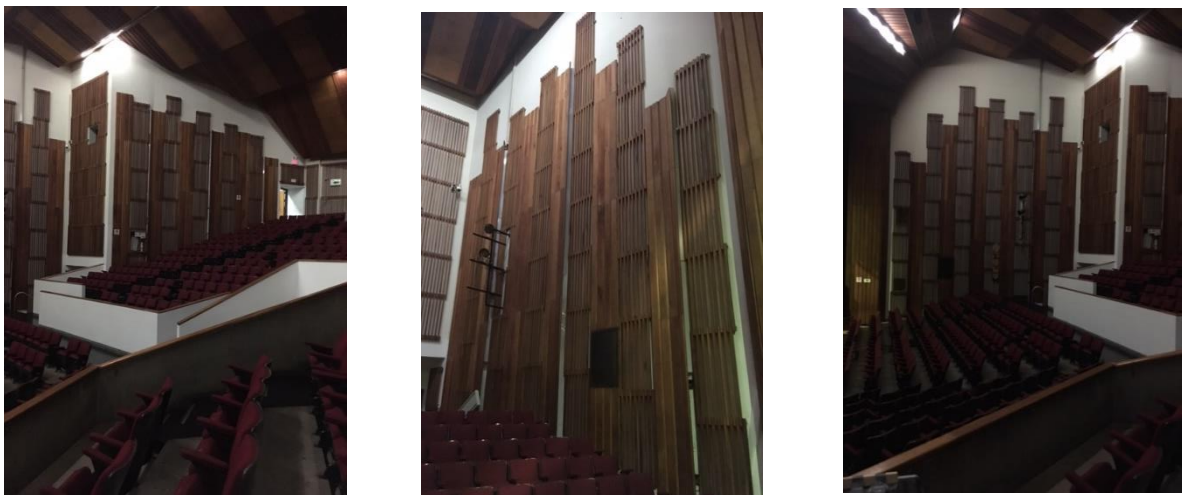


Figura 60 Revestimiento de muros perimetrales, Auditorio León de Greiff

Elaboración propia

En la zona alta de la sala, el revestimiento de madera también se intercala entre paneles de madera y listones de madera, las dimensiones de los paneles de madera tienen 1.40 metros de ancho y su altura de 3.48 metros es constante en todos los elementos revestidos. Para los listones de madera, estos revisten el elemento estructural de 1.40 metros de ancho manejando las mismas dimensiones, 6.00 cm entre cada listón con una proporción de 4.00 cm de ancho con un espesor de 5.00 cm y su altura continúa siendo igual a la de los paneles de madera. Ver figura número 61.

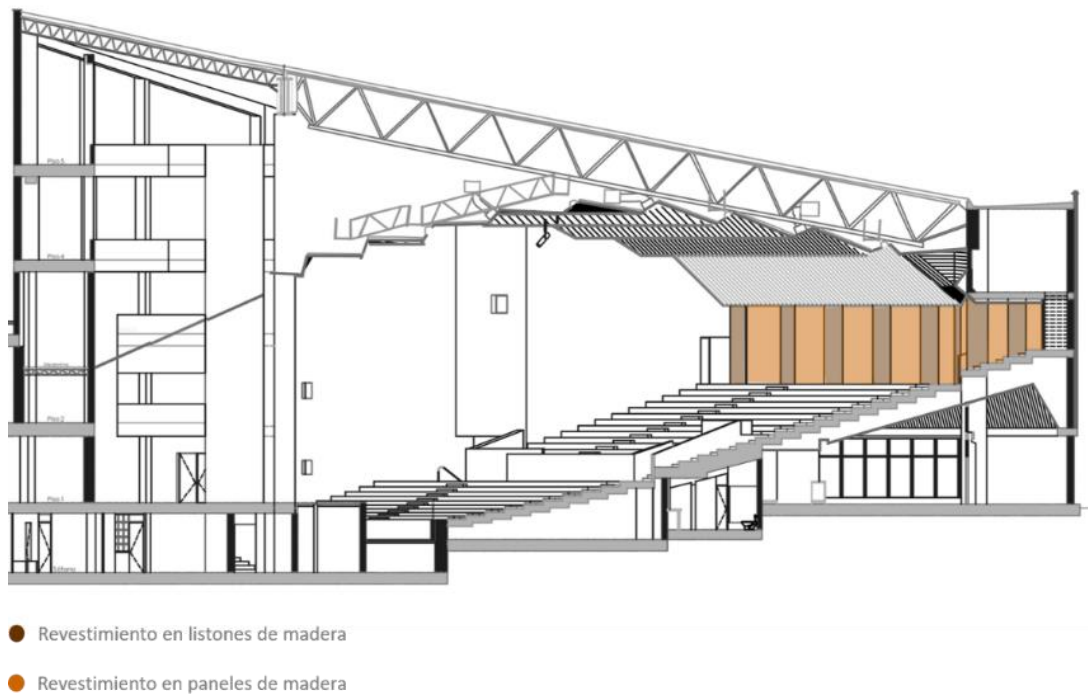


Figura 61 Revestimiento de material zona alta

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

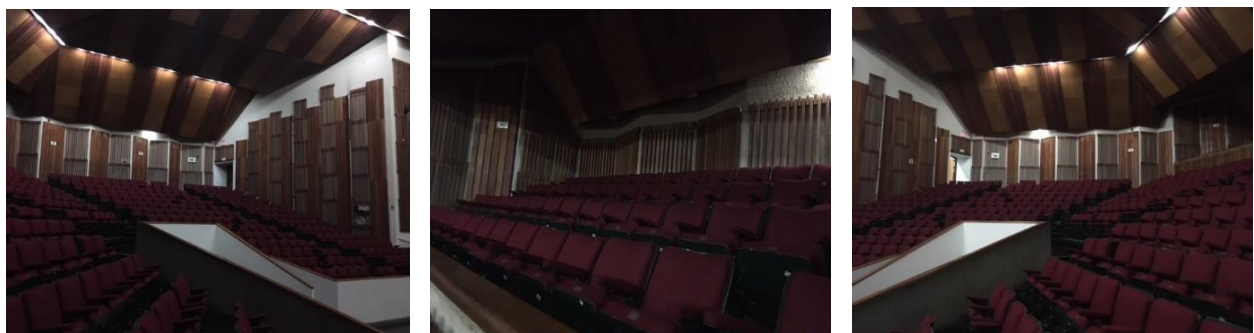
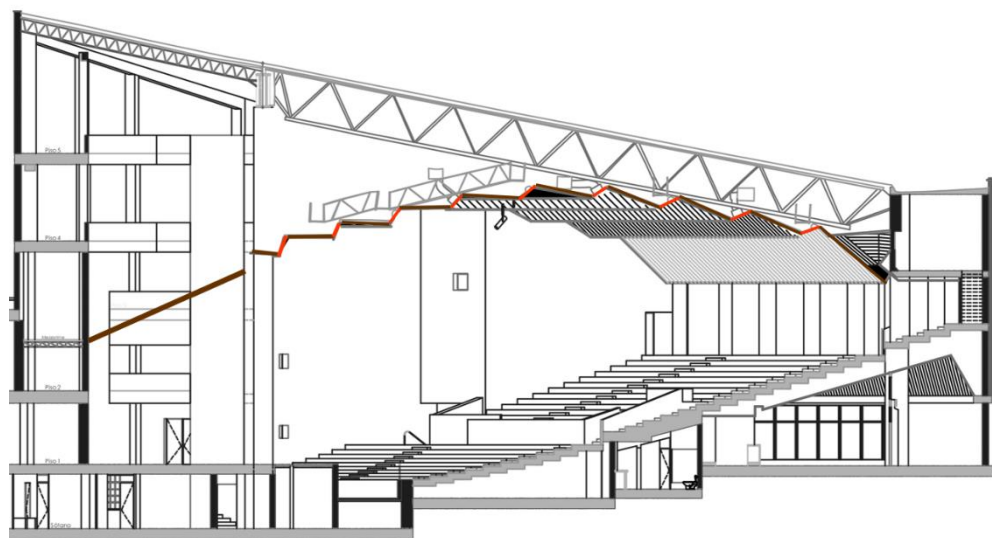


Figura 62 Revestimiento de muros perimetrales, Auditorio León de Greiff

Elaboración propia

La última característica del revestimiento de materiales para la sala, es la del cieloraso, en donde la zona del escenario, tiene un revestimiento en paneles de madera con dimensiones de 16.94 metros de ancho por 8.11 de largo. Desde el punto final del panel que se encuentra en el escenario, se conectan los paneles para la zona del aforo de la sala, cada panel tiene una dimensión entre 2.00 y 3.00 metros de ancho y 10.00 a 20.00 metros de largo, sus dimensiones varían según la direccionalidad que empieza ascendente desde el punto final del escenario y en la zona media empieza a descender hasta llegar a la parte final de la sala. Estos paneles de madera, adicionan a sus elementos escalonados una rejilla en donde se ubican los ductos de aire, para que la sala cuente con ventilación. Ver figura número 63.



- Revestimiento en paneles de madera
- Rejillas para ductos de ventilación

Figura 63 Revestimiento de cubierta

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

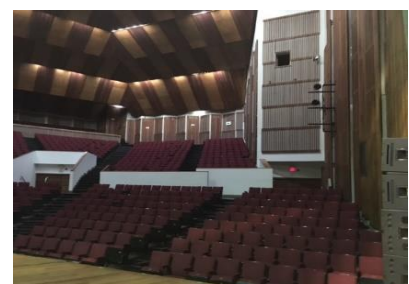
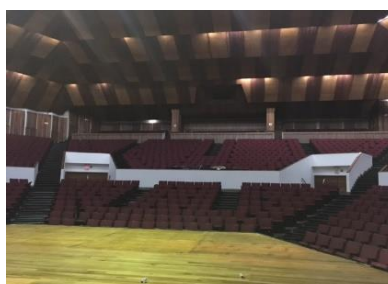


Figura 64 Revestimiento de la cubierta, Auditorio León de Greiff

Elaboración propia

El revestimiento de madera como material principal con el que está compuesta la sala ocupa un 80% total de los elementos perimetrales y ocupa un 100% en la cubierta.

6.6 ENTENDIENDO EL COMPORTAMIENTO DE LOS RAYOS SONOROS CON REVESTIMIENTO DE MATERIALES

“Cada material tiene su propio mensaje y, para los artistas creativos, su propia canción”.
(Weston, 2003, pág. 172)

La madera es el revestimiento principal con el que cuenta actualmente la sala del auditorio León de Greiff, entender el comportamiento del sonido con revestimiento de materiales permite complementar el porqué de la forma geométrica de la sala.

Se aclara que las figuras que muestran el comportamiento de los rayos sonoros con revestimiento de materiales dentro de la geometría, tienen solo un rayo en color, para representar el sonido incidente y el sonido reflejado, ya que ponerles color a todos los rayos, no permite una total comprensión del comportamiento.

El procedimiento del trazado de rayos en este capítulo se realiza mostrando solo la primera reflexión y empezando por el costado derecho. En la figura número 65 se observó que, aunque solo se realizó el trazo del primer sonido incidente y reflejado, cuando el sonido incidente choca contra el revestimiento de madera, el sonido reflejado tiene un recorrido hacia la parte de atrás de la sala, impidiendo que la zona de audiencia cuente con una distribución adecuada del sonido. Sin embargo, el elemento perimetral, cuenta con un revestimiento intercalado de paneles de madera y listones de madera para absorber el sonido y debilitar la reflexión.

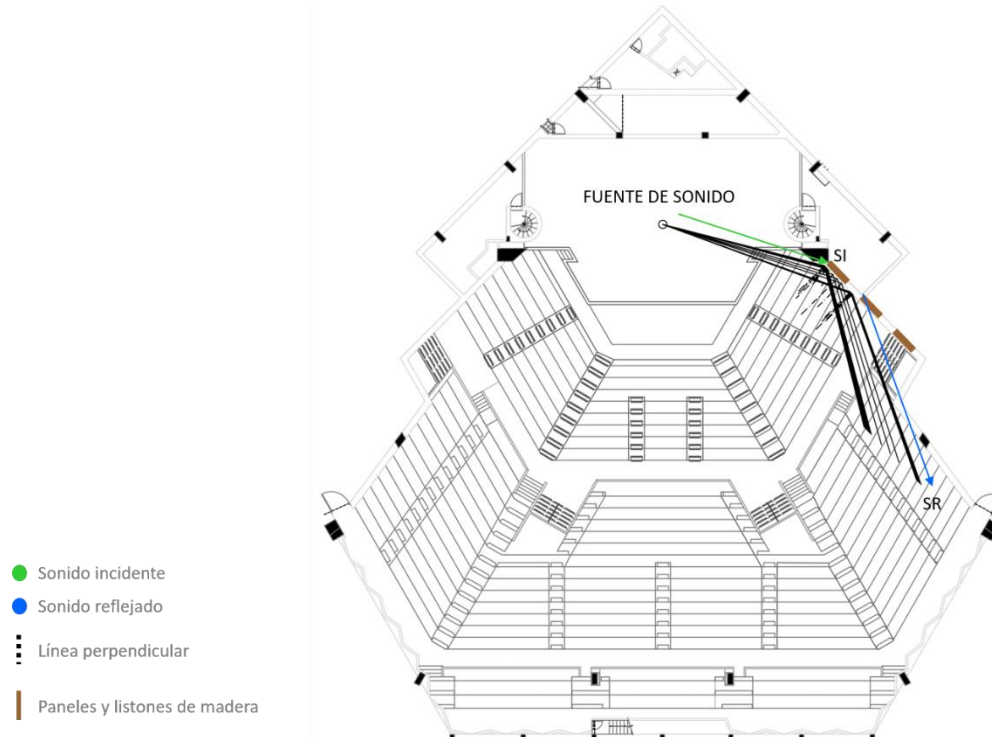


Figura 65 Trazado de rayos sonoros costado derecho zona baja

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

En la figura número 66 se realiza el procedimiento de trazado de rayos hacia el costado derecho de la zona media baja, en donde el elemento perimetral cierra un poco ese espacio de la sala y ayuda a reforzar el comportamiento del sonido en esa zona de audiencia. Ese elemento perimetral cuenta con solo listones de madera para absorber el sonido incidente y distribuir las reflexiones en más sentidos por el relieve que maneja el listón.

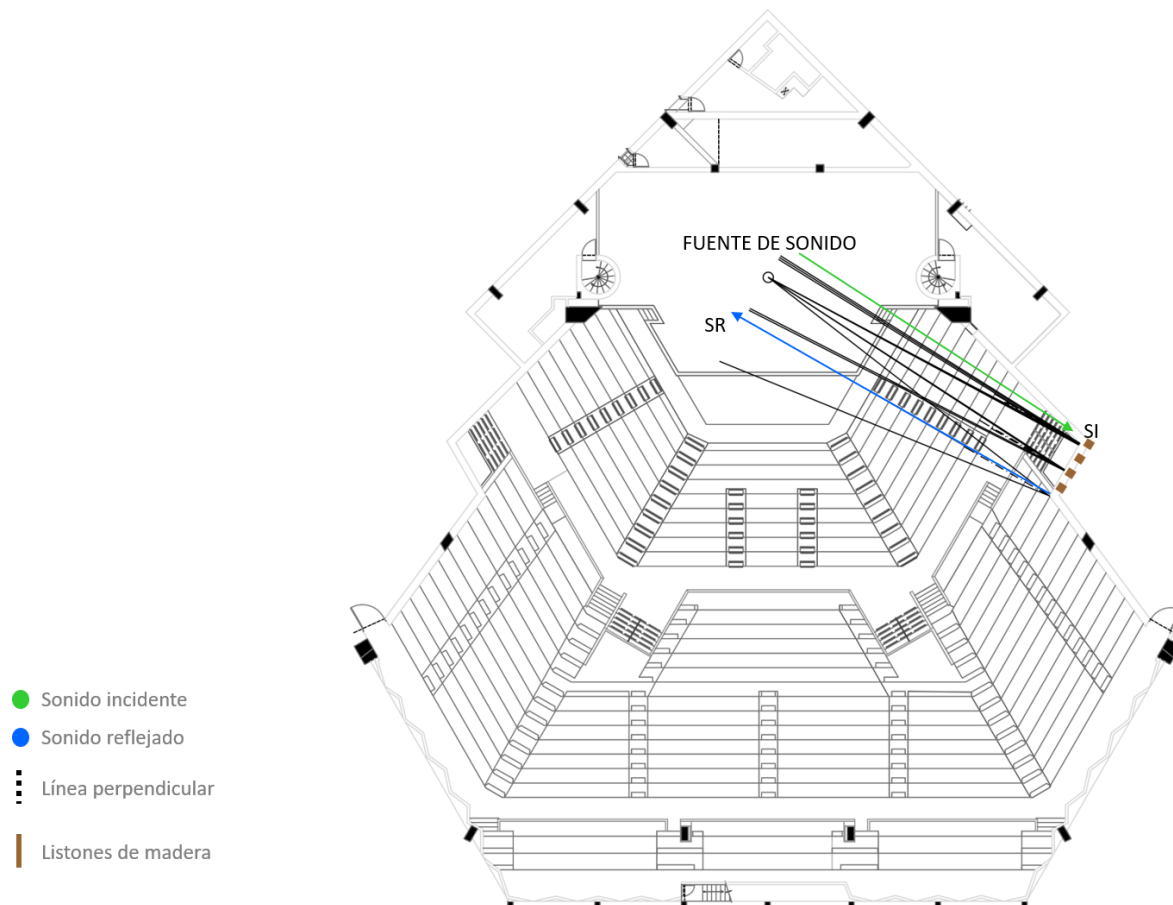


Figura 66 Trazado de rayos sonoros costado derecho zona baja media

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

En la figura número 67 se observa que cuando se realiza el mismo procedimiento, los rayos reflejados del sonido incidente también se distribuyen hacia la parte de atrás y el comportamiento del sonido en esa zona de audiencia se debilita. El elemento perimetral también cuenta con un revestimiento en paneles de madera y listones de madera, para generar la absorción más conveniente del sonido.

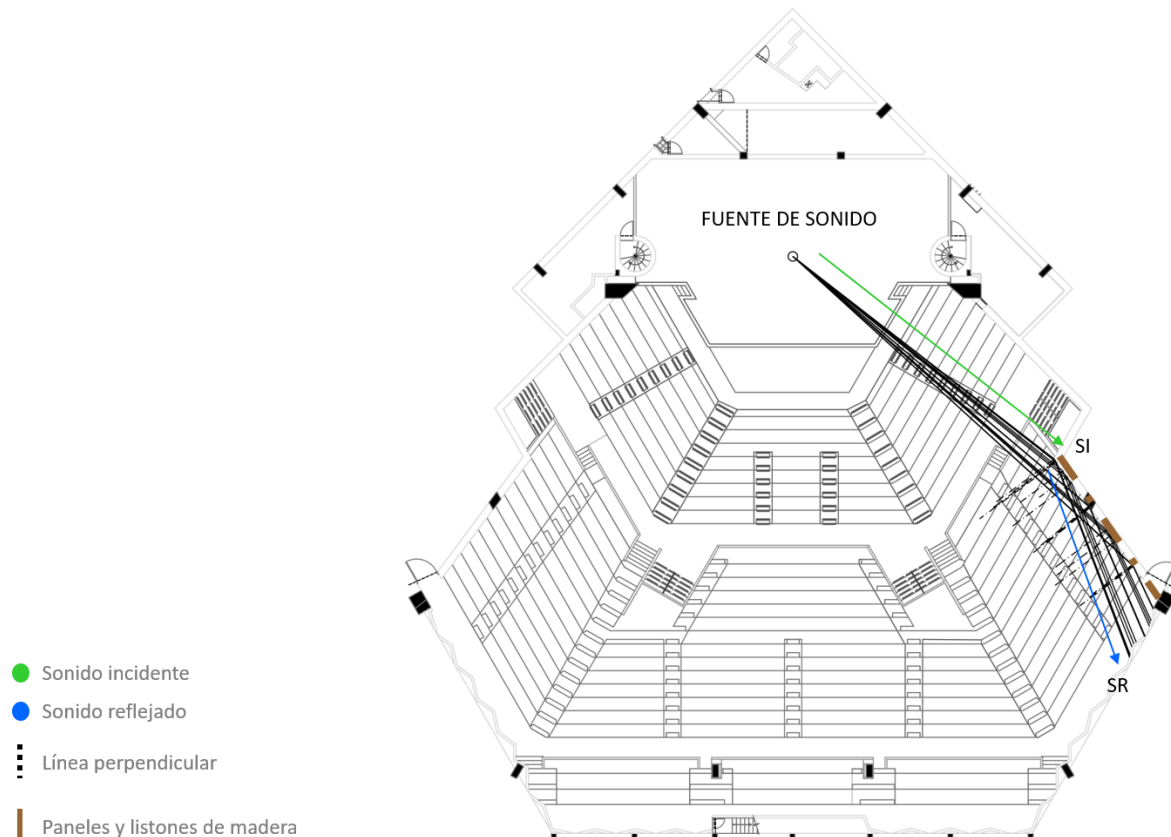


Figura 67 Trazado de rayos sonoros costado derecho zona media alta

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

En la figura número 68, 69, 70 se observa que se realizó el análisis para el costado de atrás, en donde los elementos perimetrales tienen un comportamiento en forma de zigzag y el revestimiento se instala siguiendo el mismo ritmo. El revestimiento en esta zona se intercala igualmente entre paneles de madera y listones de madera logrando una absorción y una reflexión del sonido con más movimiento en esa zona. El elemento perimetral ubicado en esta zona de atrás tiene con su comportamiento en forma de zigzag un refuerzo para los elementos perimetrales del costado derecho y del costado izquierdo ya que estos están ubicados en una sola dirección.

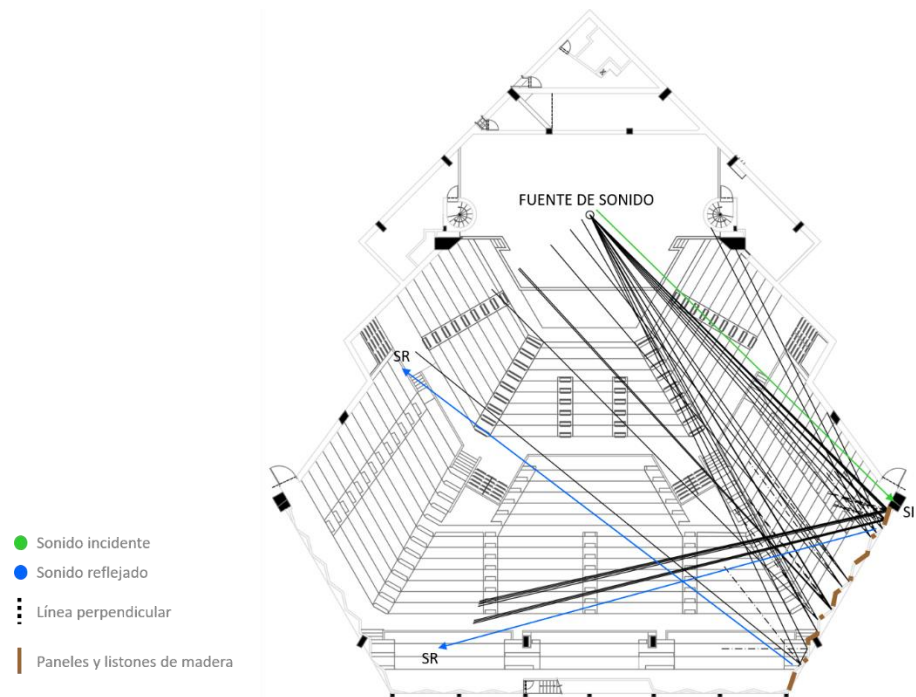


Figura 68 Trazado de rayos sonoros costado derecho zona alta

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

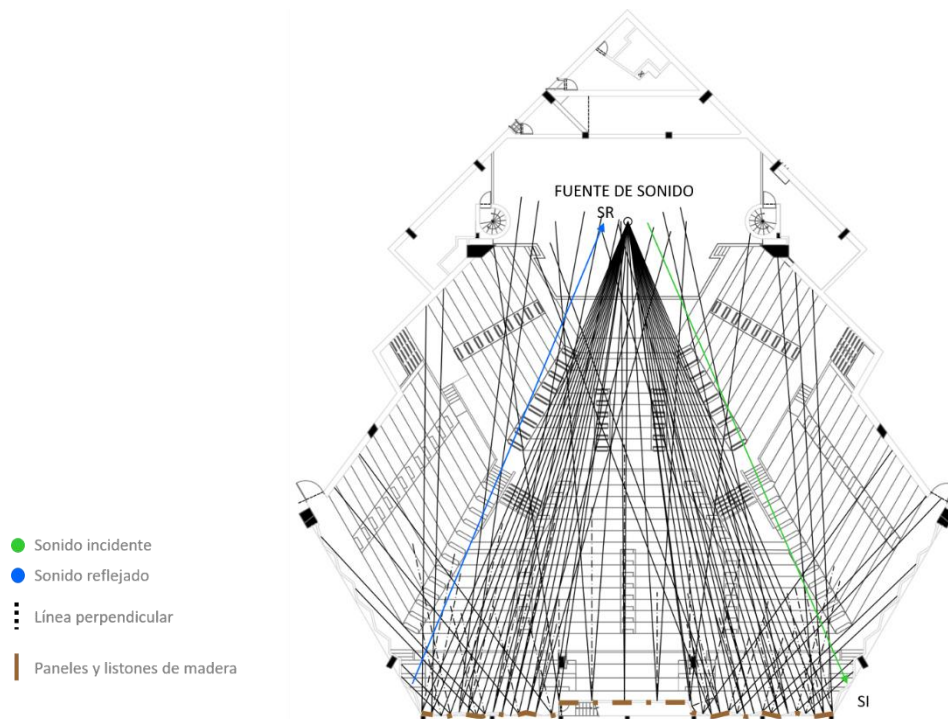


Figura 69 Trazado de rayos sonoros costado de atrás

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

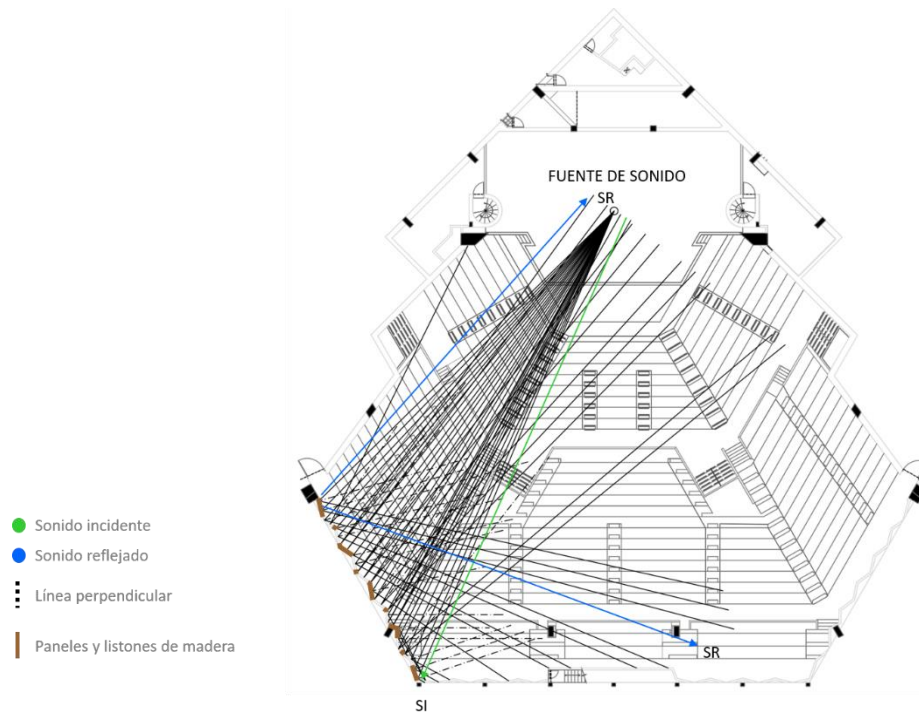


Figura 70 Trazado de rayos sonoros costado izquierdo zona alta

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

En la figura número 71 se observa que el análisis se realiza en el costado izquierdo de la sala y al comprobar que la sala es totalmente simétrica, el trazado de rayos se comporta de la misma manera que en el costado derecho con revestimiento de materiales. Los elementos perimetrales abiertos en la zona baja y en la zona media tienen un respaldo de los elementos perimetrales que cierran y se encuentran en la zona media baja y en la parte de atrás para que el comportamiento del sonido refuerce esas zonas de audiencia.

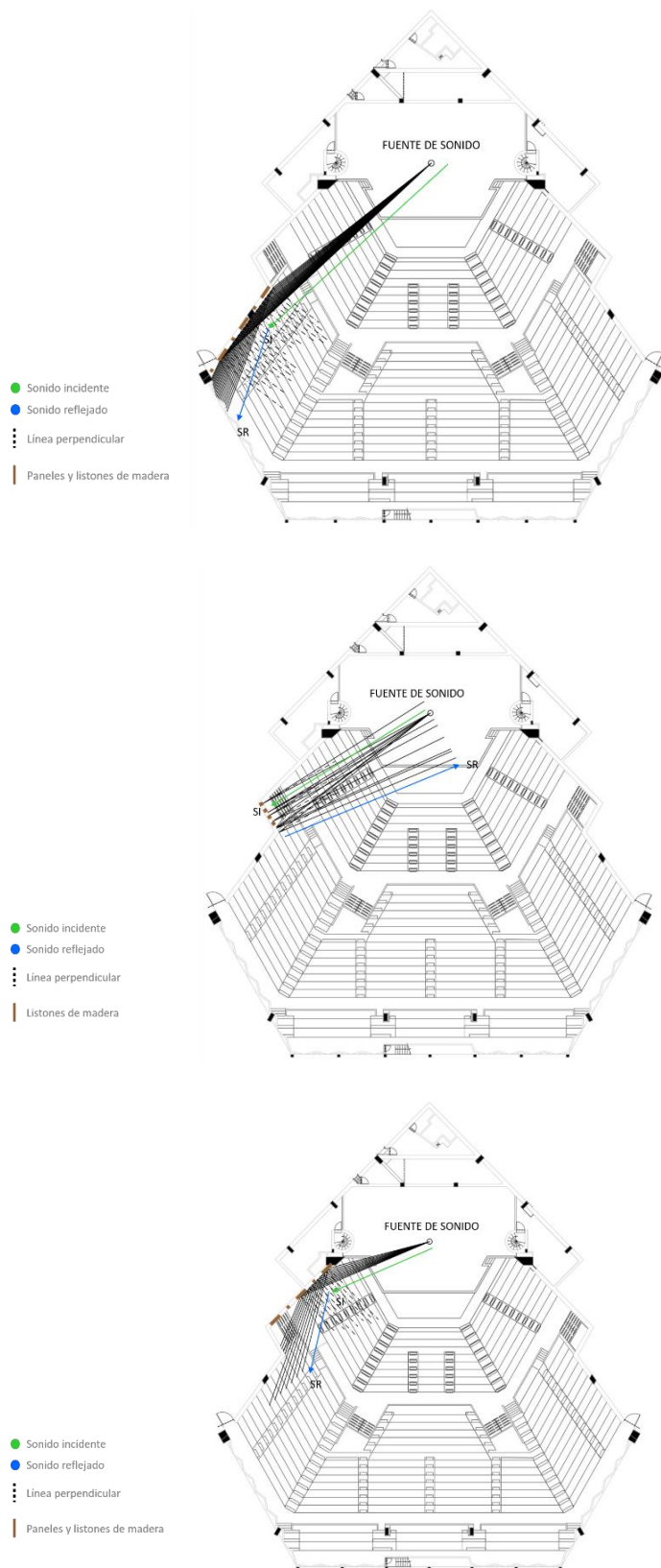


Figura 71 Trazado de rayos sonoros costado izquierdo

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

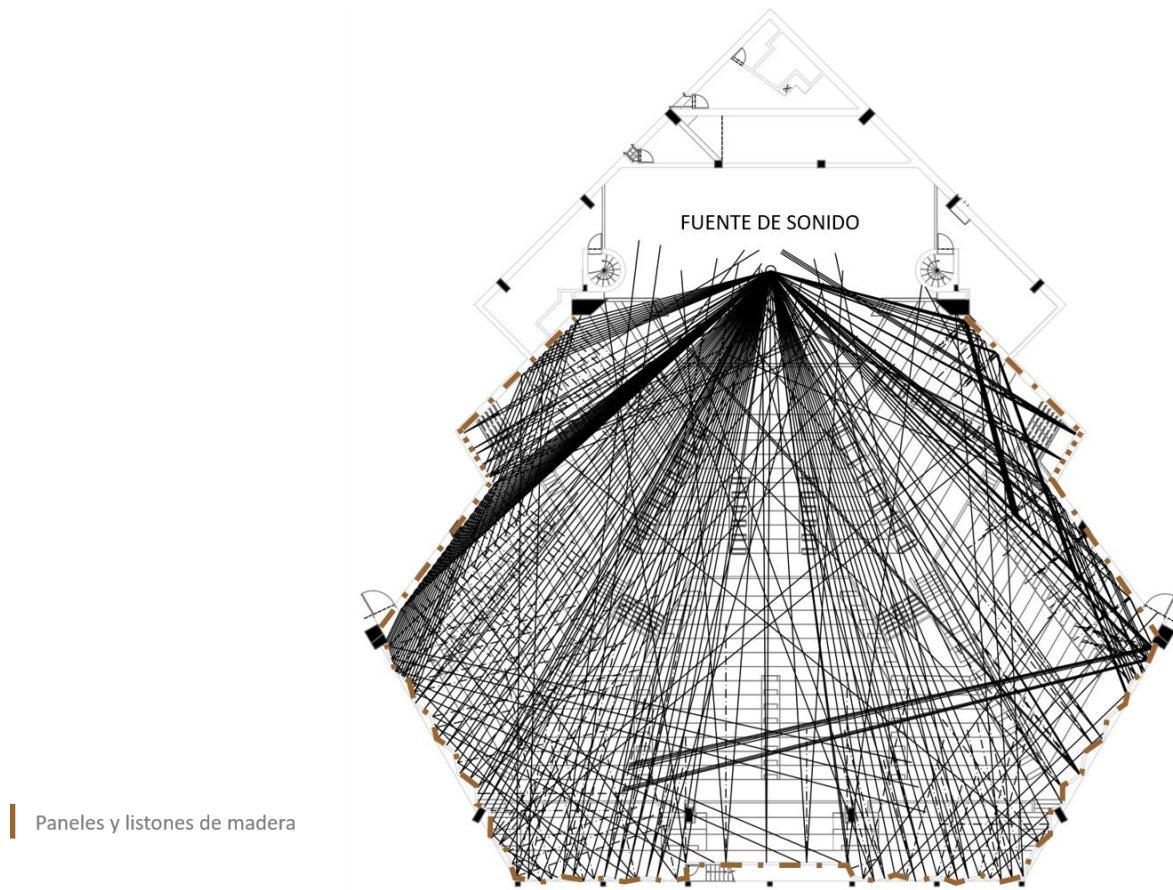


Figura 72 Trazado de rayos sonoros de la sala completa con revestimiento de material

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

Finalmente, se agrupan los rayos sonoros de todos los costados de la sala para visualizar como es el comportamiento total del primer sonido incidente y el primer sonido reflejado con revestimiento de materiales, en la figura número 72 se observa que los rayos sonoros aumentan su cantidad y esto sucede por la distribución de los paneles de madera y los listones de madera que se incluyen en la forma geométrica.

El elemento escalonado que se encuentra en la parte superior de la sala, cumple la misma función sin o con revestimiento de material, no obstante, se añade nuevamente en este capítulo porque la importancia es mostrar que cuando el elemento escalonado se reviste en paneles de madera, el comportamiento del sonido se puede absorber y puede distribuir mejor sus reflexiones. Ver figura número 73.

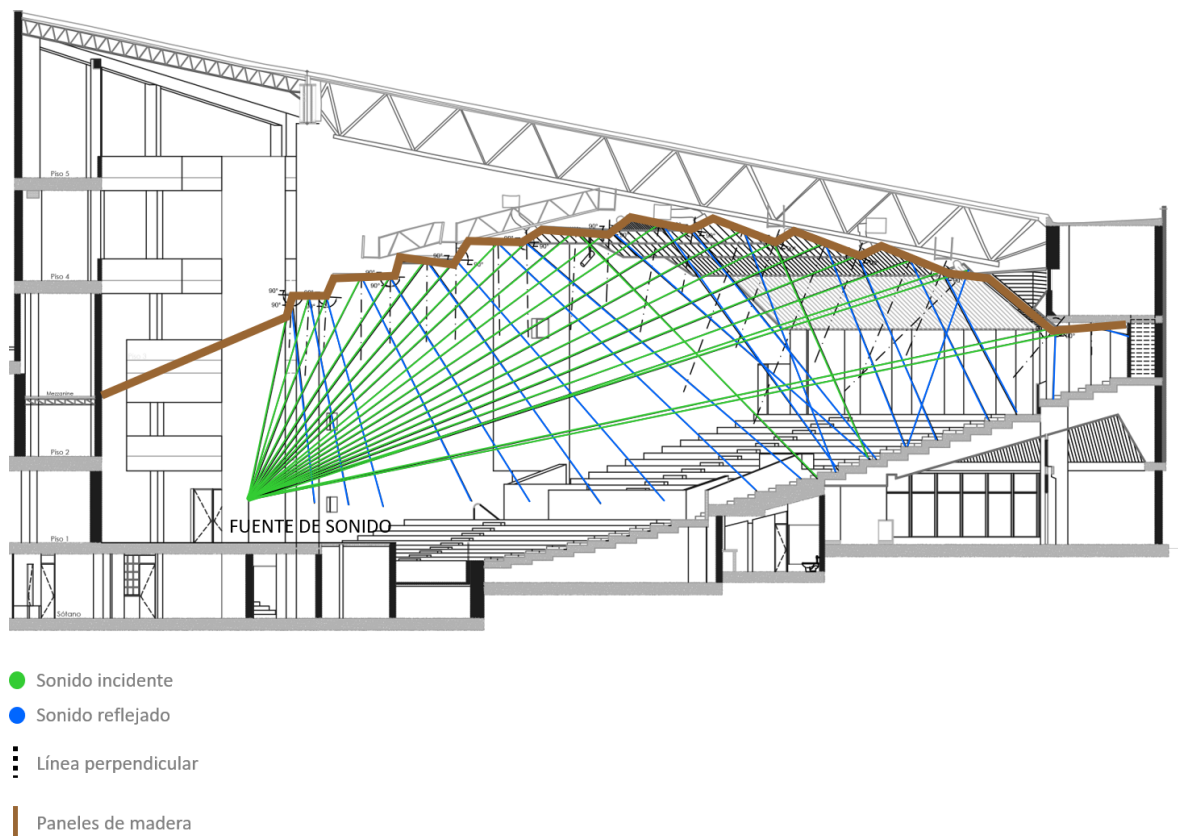


Figura 73 Trazado de rayos sonoros en corte de la sala con revestimiento de material

Elaboración propia. **Fuente:** (Colombia)

6.7 CONCLUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

La forma geométrica sin revestimiento de materiales de la sala del auditorio León de Greiff establece el posicionamiento de los elementos perimetrales para generar una distribución uniforme del sonido dentro del espacio. En la figura número 74 se muestra que en la parte baja y media los elementos tienen unos quiebres a distancias más largas y en la zona alta los elementos forman unos quiebres en zigzag a una distancia más corta.

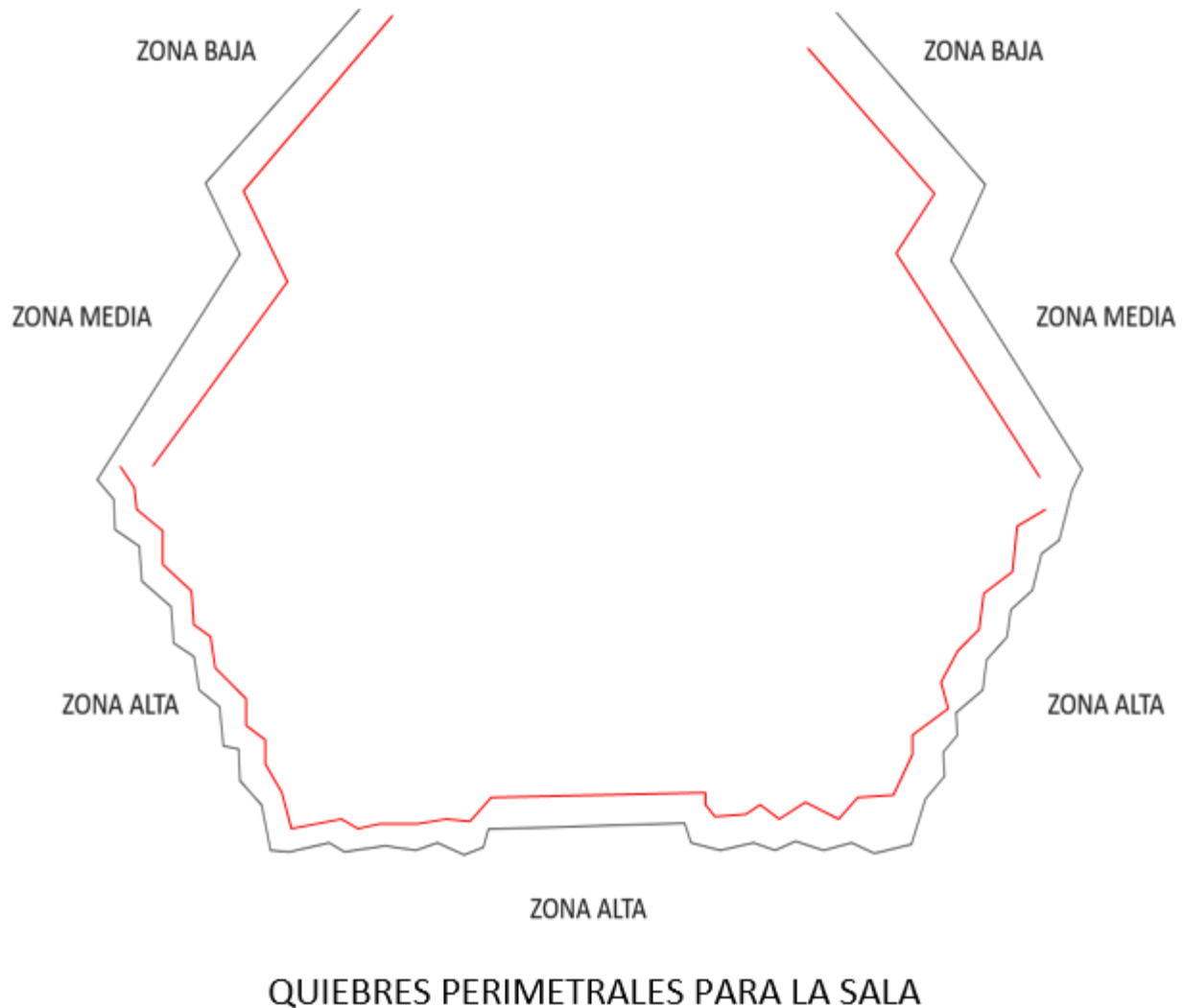


Figura 74 Quiebres perimetrales para la sala

Elaboración propia

La función más importante de los quiebres en los elementos perimetrales como se mencionó antes, es generar una distribución adecuada del sonido dentro del espacio, pero en los elementos de la zona baja y media que tienen una distancia más grande entre sus quiebres se quiere generar un adecuado punto de vista hacia el escenario. En la zona alta los elementos aumentan su secuencia para evitar el paralelismo del sonido y que este pueda llegar a toda la zona.

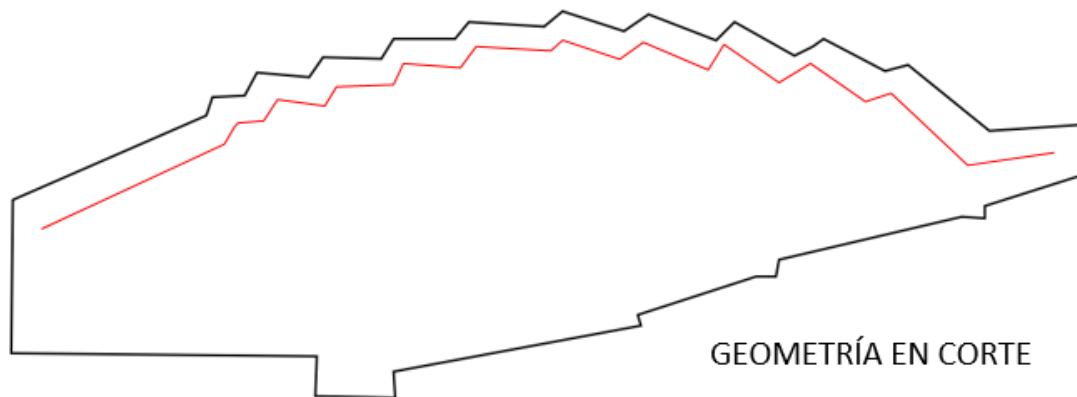
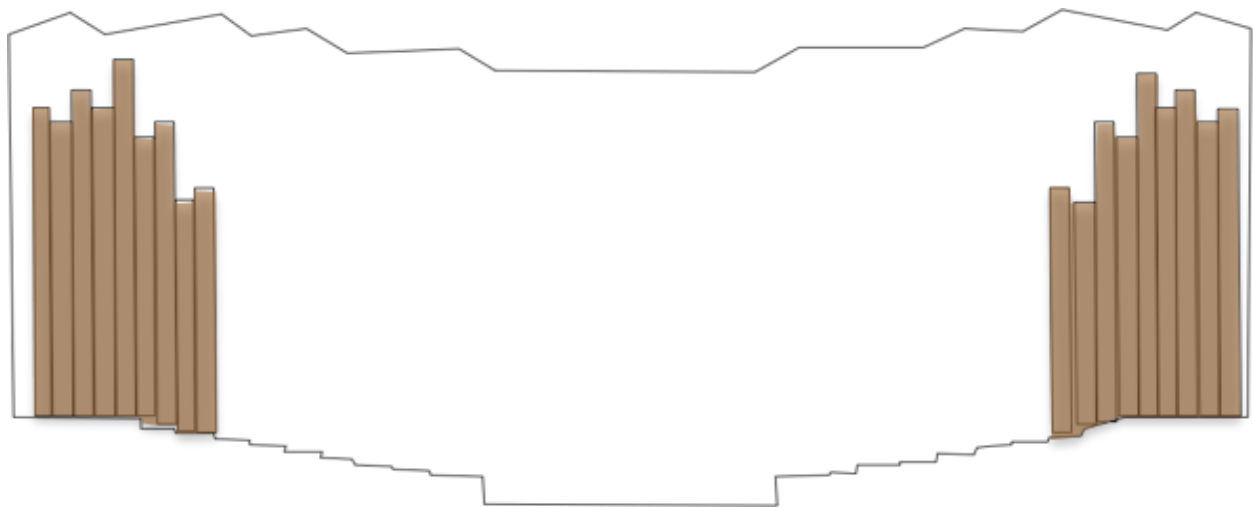


Figura 75 Geometría en corte

Elaboración propia

En la figura 75 se muestra la geometría en corte y las características que tiene el elemento superior, sus quiebres tienen unos planos inclinados que favorecen la distribución del sonido dentro del espacio. En la parte inferior, la inclinación refuerza las visuales hacia el escenario.



GEOMETRÍA CON REVESTIMIENTO DE MATERIALES

Figura 76 Geometría con revestimiento de materiales

Elaboración propia

En la figura 76 la forma geométrica introduce el revestimiento de materiales en los elementos perimetrales, para mostrar que los listones y los paneles de madera refuerzan la geometría de acuerdo al posicionamiento y a las proporciones que se manejan en cada uno. De igual manera pasa con el elemento superior, que incluye paneles de madera en sus inclinaciones. Además de esto, el uso de la madera en los listones y en los paneles ya empieza a intervenir como material acústico dentro de la sala.

7. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS PARA OTORGAR CRITERIOS ACÚSTICOS A LA GEOMETRÍA

“El carácter acústico del espacio es un fenómeno cualitativo y cotidiano de la experiencia humana, que estimula los sentidos, en especial el del oído, producto de la respuesta del sonido a la configuración arquitectónica del lugar, que puede generar una atmósfera y un ambiente de confort, y en su caso expresar sentimientos y sensaciones artísticas.” (Rodríguez, 2013, pág. 102)

Los conceptos explicados en el marco teórico, fueron el soporte para realizar la caracterización de los parámetros acústicos a la forma geométrica del auditorio León de Greiff, estos parámetros se escogieron de acuerdo a los criterios más adecuados para caracterizar y entender el comportamiento del sonido dentro de la sala. Cuando se tomó el auditorio León de Greiff como estudio de caso, se distinguió que en esta sala se realizan diferentes tipos de actividades, permitiendo especificar que el análisis acústico se dirigió a entender el comportamiento del sonido en una sala polivalente.

El análisis acústico del auditorio León de Greiff, se realiza por medio de una simulación acústica para establecer diferencias comparativas con los análisis expuestos anteriormente a la forma geométrica. Es por esto que este proceso se divide en dos etapas:

1. Sala en estado de ocupación vacío sin revestimiento de materiales
2. Sala en estado de ocupación con revestimiento de materiales

Cada etapa se desarrolló analizando seis parámetros físicos que otorgaron criterios acústicos a la forma:

- A. Tiempo de reverberación (RT)
- B. Inteligibilidad de la palabra (STI)
- C. Claridad musical C80
- D. Claridad de la voz C50
- E. Pérdida de la articulación de las consonantes (%ALCONS)
- F. Distribución sonora (SPL)

Después de obtener los resultados de los parámetros acústicos, se realizó una auralización para obtener un audio que permitió exponer el comportamiento del sonido en cada etapa.

Para el desarrollo de los análisis de los parámetros físicos para otorgar criterios acústicos a la forma, se desarrolló un modelo en SketchUp versión PRO2016 en donde se realizó un modelo en 3D para llevar a cabo una simulación acústica en el programa EASE versión 4.3. En la figura número 77, 78, 79 se muestra el levantamiento que se realizó en SketchUp para manipular las líneas de acuerdo a las exigencias del programa EASE.

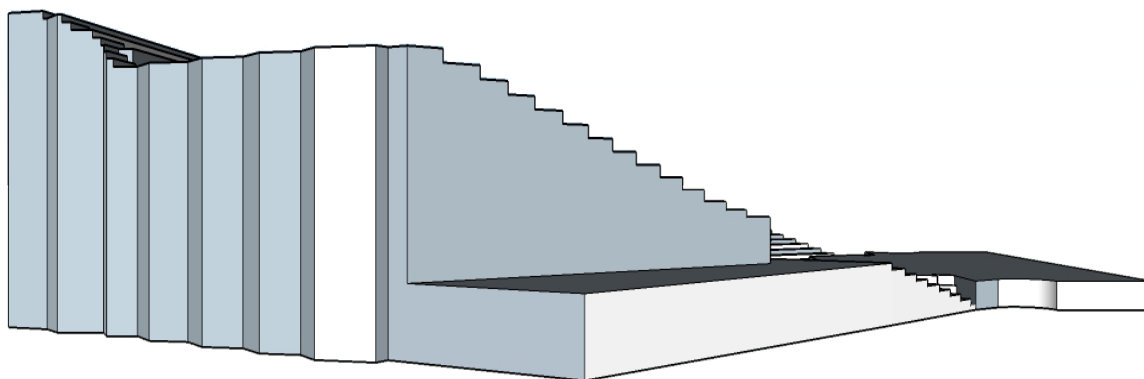


Figura 77 Levantamiento del costado derecho

Elaboración propia (SketchUp)

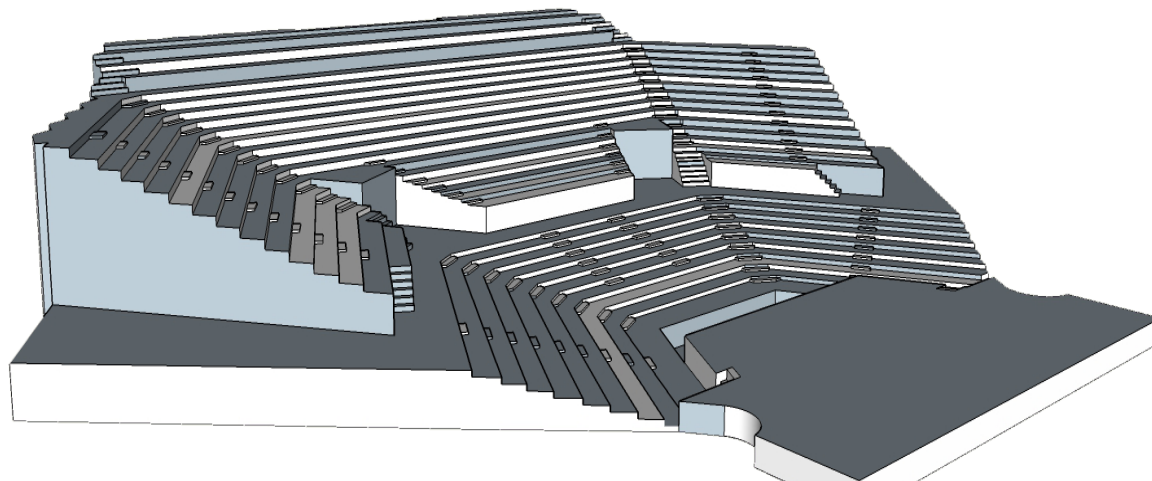


Figura 78 Levantamiento de la sala completa

Elaboración propia (SketchUp)

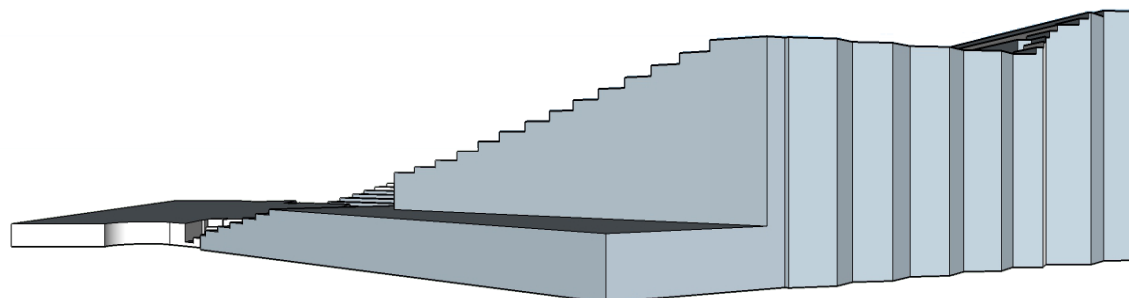


Figura 79 Levantamiento costado izquierdo

Elaboración propia (SketchUp)

7.1 ANÁLISIS DE CRITERIOS SIN REVESTIMIENTO DE MATERIALES

Teniendo en cuenta los datos arrojados por el software EASE 4.3 luego de realizar el modelo tridimensional, se tiene en primera instancia que el objeto cuenta con aproximadamente 781 caras internas las cuales son tomadas como superficies de incidencia sonora. El principal objetivo de la primera etapa es conocer y poder percibir auditivamente el comportamiento de un espacio destinado como sala polivalente sin tener en cuenta ningún tipo de intervención de revestimiento de materiales.

El análisis se realizó sin el revestimiento de materiales actual y solo se tuvo en cuenta la conformación de los elementos perimetrales y el elemento escalonado de la cubierta para conocer el comportamiento del sonido dentro de una forma geométrica con un solo material, el concreto liso sin acabado, el cual presenta el siguiente comportamiento de absorción.

En la tabla 2 y en la figura número 80 se exponen los coeficientes de absorción del material utilizado en la simulación para la estimación acústica, en la primera etapa se puede evidenciar que este material se comporta como reflectante al presentar valores pequeños en capacidad para absorber energía.

Tabla 2 Coeficientes de absorción del concreto en el rango de frecuencias 100 a 10.000Hz

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN																					
Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
CONCRETO SIN ACABADO																					
	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Elaboración propia

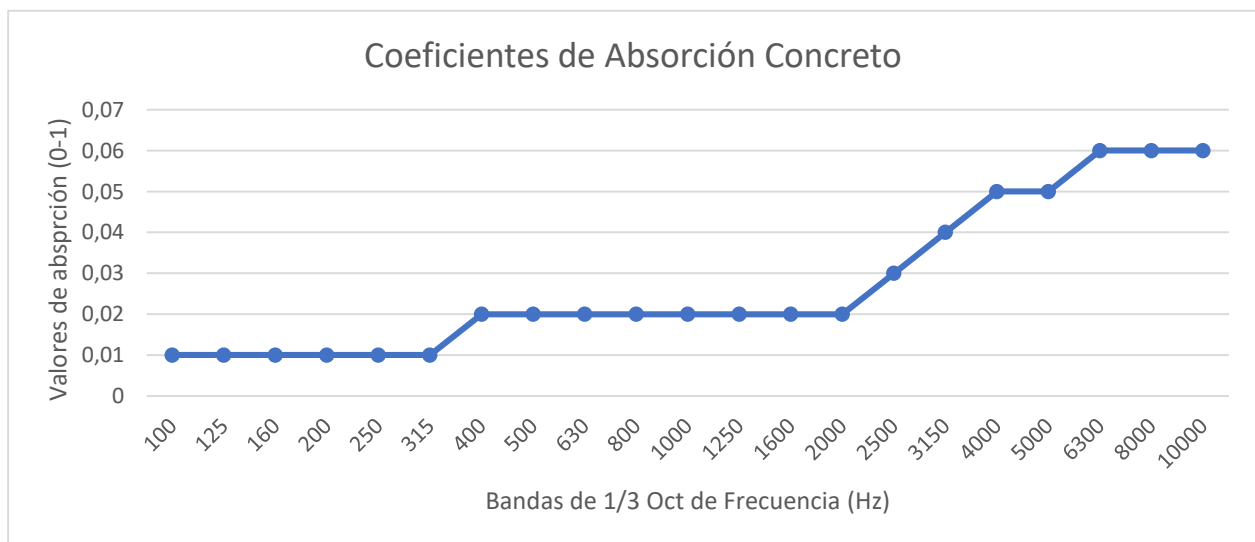


Figura 80 Gráfico de absorción del concreto por frecuencia

Elaboración propia

A. TIEMPO DE REVERBERACIÓN

El tiempo de reverberación es una de las cualidades más importantes que afectan la opinión subjetiva y objetiva de las personas hacia la sala. Sin embargo, en la estimación de valores de la simulación, la forma geométrica con concreto liso sin acabado comprueba que el tiempo de reverberación no está dentro de los rangos aconsejado para una sala polivalente. Ver tabla número 1 en donde se indica que el RT mid aconsejado para una sala polivalente esta entre 1.2 – 1.5

En la figura número 81 se observan los valores del tiempo de reverberación de la sala sin revestimiento de materiales, muestra que su comportamiento no es estable y supera los rangos óptimos de 1.2 y 1.5 segundos en las frecuencias de 500 Hz hasta los 1000 Hz, se tomaron en cuenta estas frecuencias ya que el oído humano es más sensible a los tonos graves con frecuencias de 125 Hz a 250 Hz y a los tonos agudos con frecuencias entre 2000 Hz a 4000 Hz.

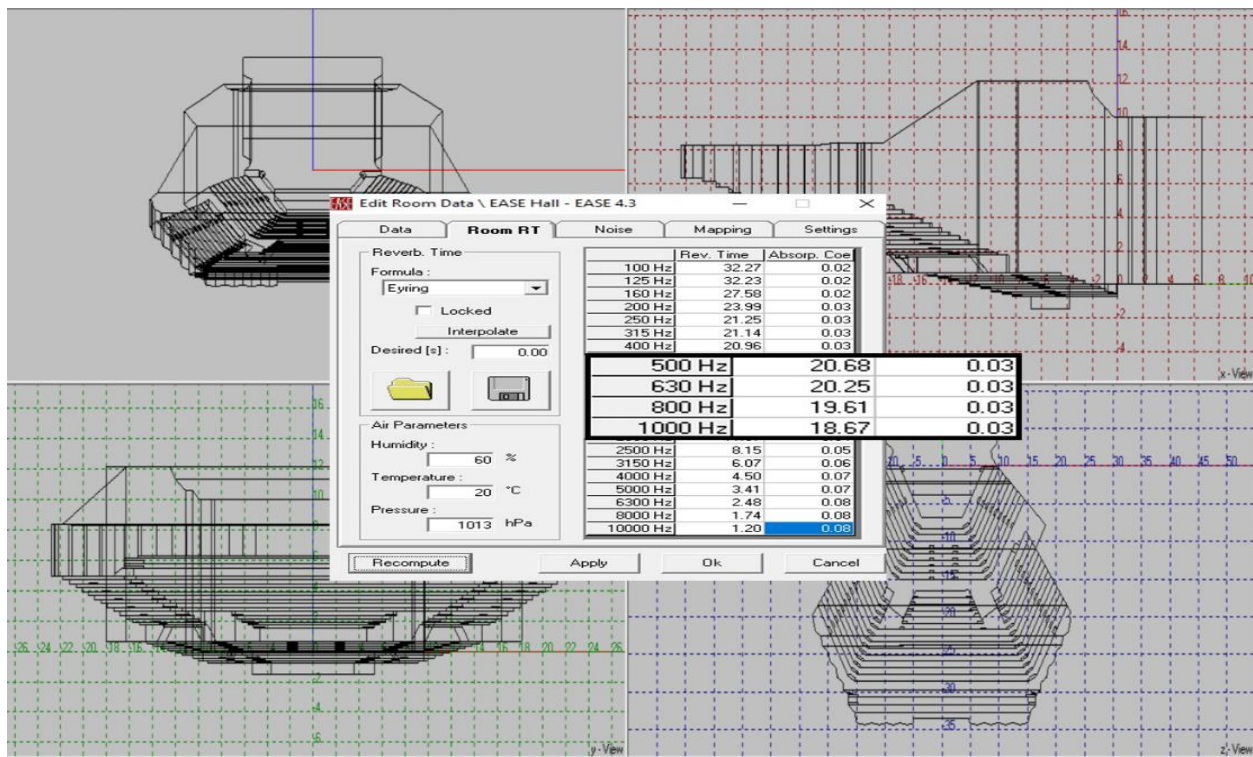


Figura 81 Tiempo de reverberación calculados por el software EASE 4.3

Elaboración propia (EASE 4.3)

B. ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (STI)

El comportamiento de la inteligibilidad de la palabra en el modelo realizado sin revestimiento de materiales en el software EASE 4.3 es completamente bajo, presenta un índice de **0.37** máximo de STI en la zona más cercana al escenario y un valor de STI **0.25** exacto en las zonas más lejanas del escenario. Esto quiere decir que la intensidad de la señal sonora es menor y se encuentra dentro de una sala reverberante donde llegan múltiples reflexiones y se pierde el sonido directo con pobre y mala inteligibilidad de la palabra, ya que sus rangos están por debajo de **0.45** STI. Ver figura número 82.

$STI \leq 0,3$ MALA

$0,3 \leq STI \leq 0,45$ POBRE

$0,45 \leq STI \leq 0,6$ DÉBIL

$0,6 \leq STI \leq 0,75$ BUENA

$0,75 \leq STI \leq 0,9$ EXCELENTE

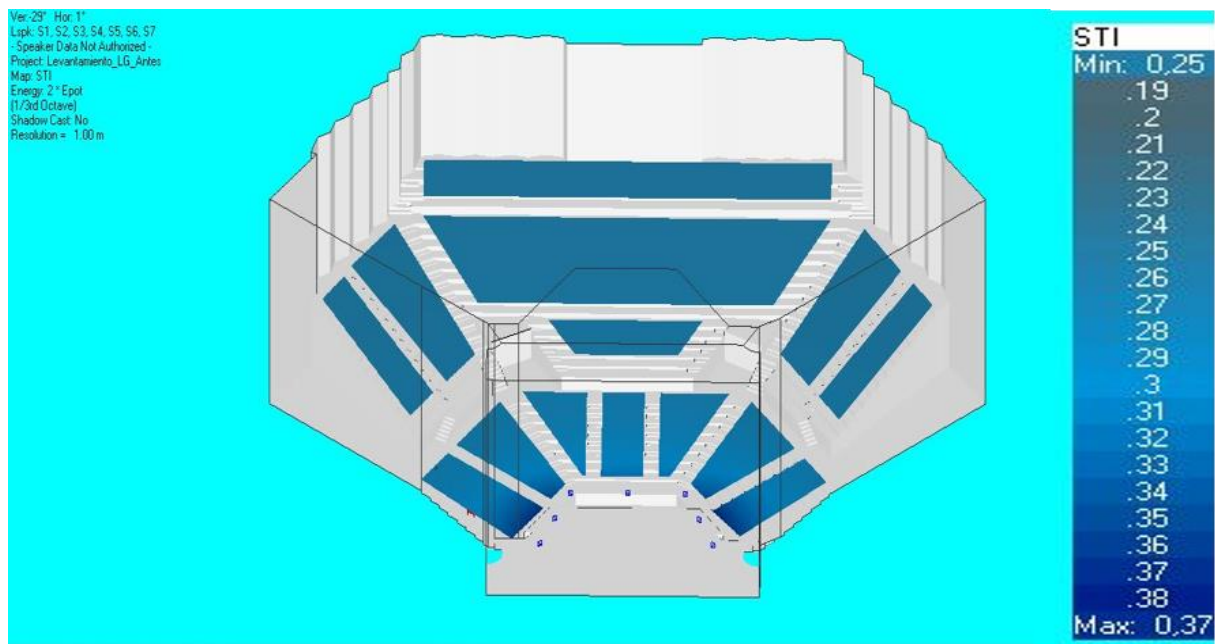


Figura 82 Índice de transmisión de la palabra (STI) calculados por el software EASE 4.3.

Elaboración propia (EASE 4.3)

C. CLARIDAD MUSICAL C80

El comportamiento de la claridad musical C80 se evalúa en varios puntos en relación al nivel de intensidad con el que los sonidos son percibidos. Para la sala del auditorio León de Greiff se evidencia que los rangos en decibels se encuentran en un rango negativo, es decir que la claridad musical no se aproxima a tener decibels en rangos positivos. En la zona baja, la más cercana al escenario, el rango de intensidad es máximo y se encuentra en **-6.92** decibels. El resto de la sala cuenta con un rango mínimo de potencia y llega a los **-11.8** decibels. El comportamiento del nivel de la claridad musical, al tener rangos negativos, no permite que la intensidad se distribuya adecuadamente para toda la sala sino solo para la zona más cercana. Ver figura 83.

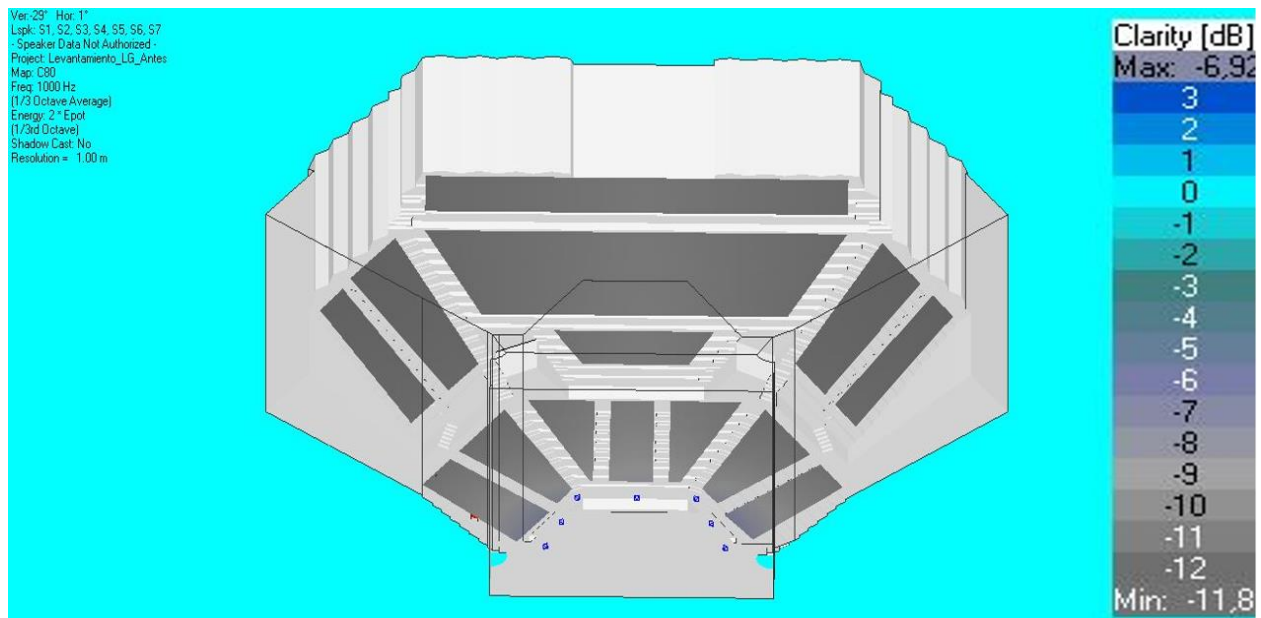


Figura 83 Claridad musical C80 calculados por el software EASE 4.3

Elaboración propia (EASE 4.3)

D. CLARIDAD DE LA VOZ C50

Para el comportamiento de la claridad de la voz C50 pasa lo mismo que en la claridad musical C80, se mide en decibels, esto quiere decir la intensidad sonora que emite la fuente de sonido y sus rangos aconsejados para la energía sonora durante los primeros 50ms deben ser positivos. Estos dos parámetros se complementan en el análisis de una sala polivalente, ya que se debe tener en cuenta las diferentes fuentes sonoras para las actividades en un escenario. La claridad de la voz presenta en la zona más cercana al escenario un rango máximo de **-8.12 decibels** y para el resto de la sala presenta un rango mínimo de **-16.4 decibels**. Aunque en la zona más cercana la potencia sea mejor, los rangos para toda la sala se encuentran en estado negativo, es decir pérdida completa de la claridad de la voz. Ver figura 84.

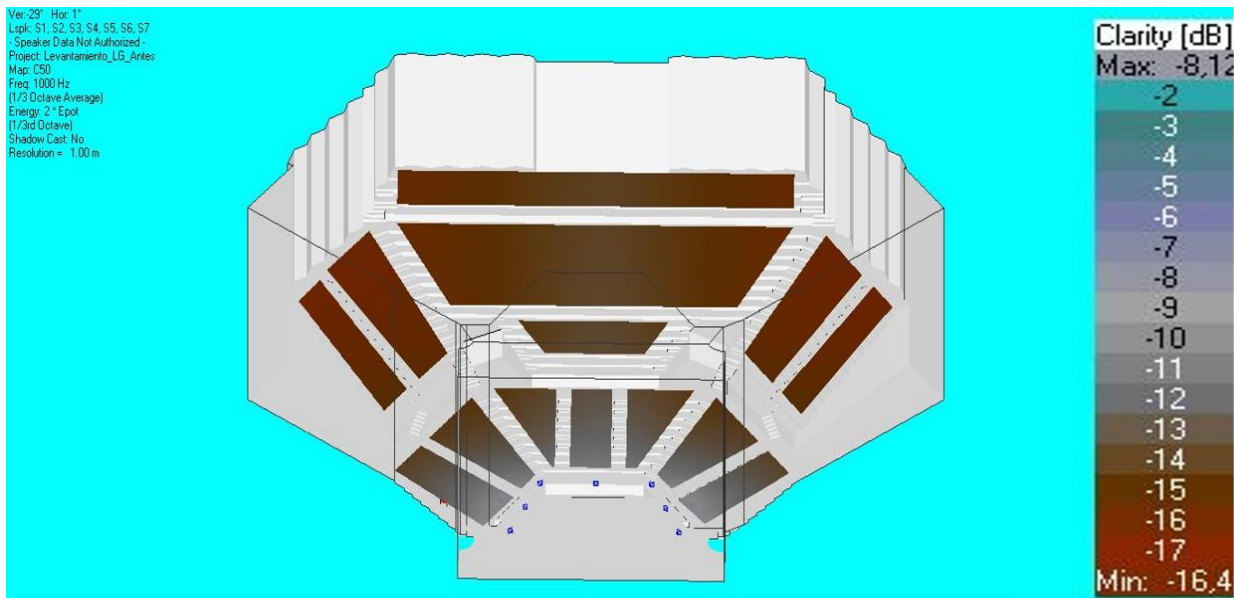


Figura 84 Claridad de la voz C50 calculados por el software EASE 4.3

Elaboración propia (EASE 4.3)

E. PERDIDA DE LA ARTICULACIÓN DE LAS CONSONANTES %ALCONS

La pérdida de la articulación de las consonantes mide sus rangos en porcentaje y busca que su valor sea mínimo. El comportamiento de la articulación de las consonantes en la sala presenta en la zona más cercana al escenario un **porcentaje de 22.7** llegando a **43.1 por ciento** en el resto de la sala. El comportamiento en general de la articulación de las consonantes en la sala sin revestimiento presenta un porcentaje muy alto, es decir que la articulación de las consonantes percibidas en cualquier punto de la zona del público no es clara. Ver figura 85.

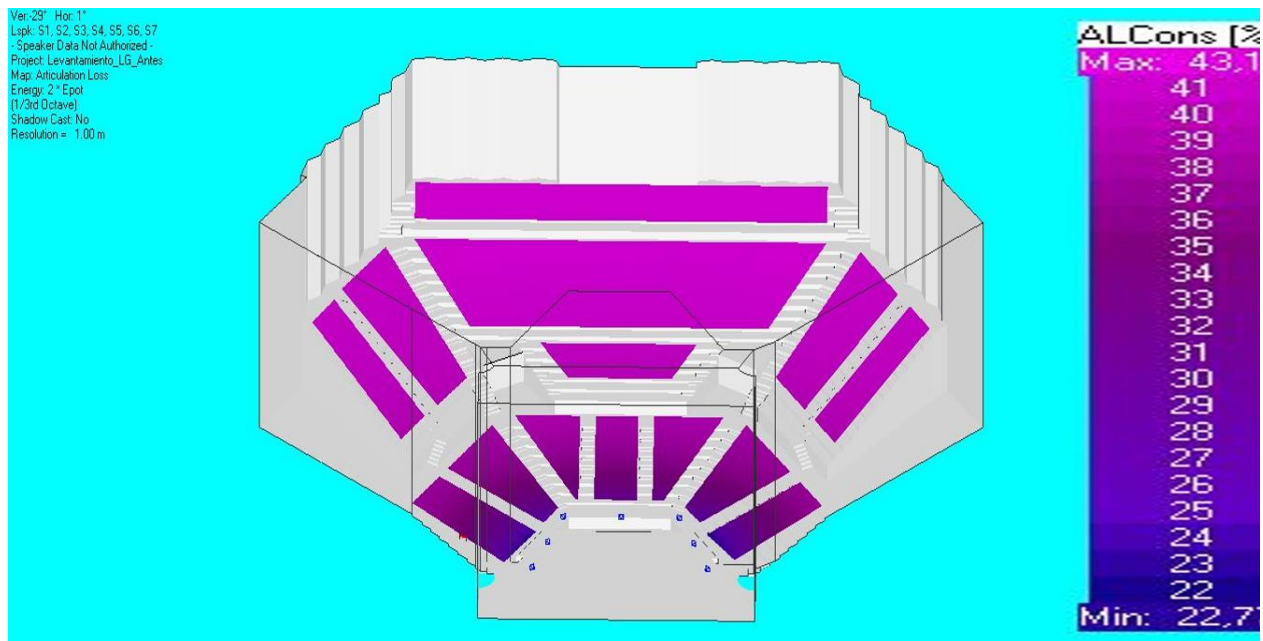


Figura 85 Articulación de las consonantes calculados por el software EASE 4.3

Elaboración propia (EASE 4.3)

F. DISTRIBUCIÓN SONORA (SPL)

Cuando se habla de nivel de presión sonora se busca conocer que tan intenso es un sonido, es decir, que tan alto o que tan bajo una fuente emite una señal. Dentro de este análisis se tuvo en cuenta que los altavoces escogidos para la simulación fueron omnidireccionales y emitían un ruido rosa, que se caracteriza por tener un nivel sonoro adecuado para el oído en todas las frecuencias. El comportamiento de la presión sonora también se mide en decibeles y para la sala en la zona más cercana al escenario el nivel de la presión sonora está en un rango máximo de **85.67 decibeles** y su distribución para el resto de la sala presenta un rango mínimo de **63.07 decibeles**. Para este parámetro la función principal es que el nivel de la presión sonora se distribuya adecuadamente en toda la sala. En este caso la presión sonora es mejor en la zona más cercana al escenario y en las partes de atrás se empieza a perder esa presión. Ver figura 86.

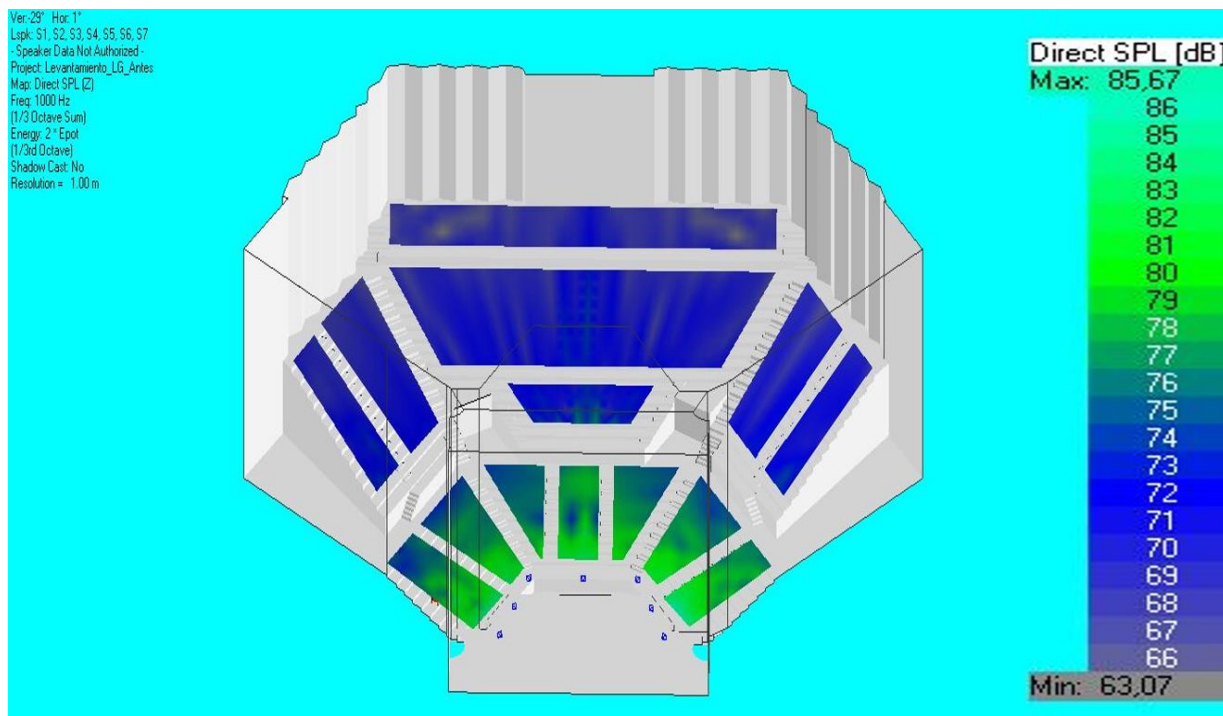


Figura 86 Distribución sonora SPL calculados por el software EASE 4.3

Elaboración propia (EASE 4.3)

G. AURALIZACIÓN

“El carácter acústico del espacio va más allá de los decibeles y los segundos. El sonido se manifiesta en el espacio por una respuesta acústica del recinto, cuyos indicadores se miden a través de parámetros objetivos de la acústica de los recintos; dichos parámetros se expresan de decibeles, segundos y porcentajes, es lo cuantitativo. Pero el carácter acústico del espacio va mucho más allá de lo cuantitativo, se expresa como una cualidad.” (Rodríguez, 2013, pág. 160)

El desarrollo de una auralización en esta investigación, se realizó para complementar los parámetros físicos que otorgaron criterios acústicos a la forma. Esta auralización fue el proceso que permitió simular una escucha dentro de la sala, para comparar el comportamiento del sonido sin revestimiento de materiales y con revestimiento de materiales.

El resultado de la auralización sin revestimiento de materiales, permite escuchar que dentro de la sala el comportamiento del sonido no es el más adecuado para que los usuarios perciban de una manera conveniente los mensajes de la música o de la palabra, se escucha que el tiempo de reverberación del sonido del mensaje se demora mucho en desaparecer y la sala se vuelve completamente viva y reflectante. Este resultado evidencia que para un óptimo comportamiento del sonido dentro de la forma geométrica es necesario hacer intervención de revestimiento de materiales para mejorar notablemente el tiempo de reverberación y la distribución del sonido en toda la sala.



7.2 ANÁLISIS DE CRITERIOS CON REVESTIMIENTO DE MATERIALES

Para la simulación de la segunda etapa, se completó el desarrollo del levantamiento en SketchUp. En las figuras número 87, 88, 89 se muestra cómo quedó el volumen completamente cerrado para exportarlo al software EASE 4.3.

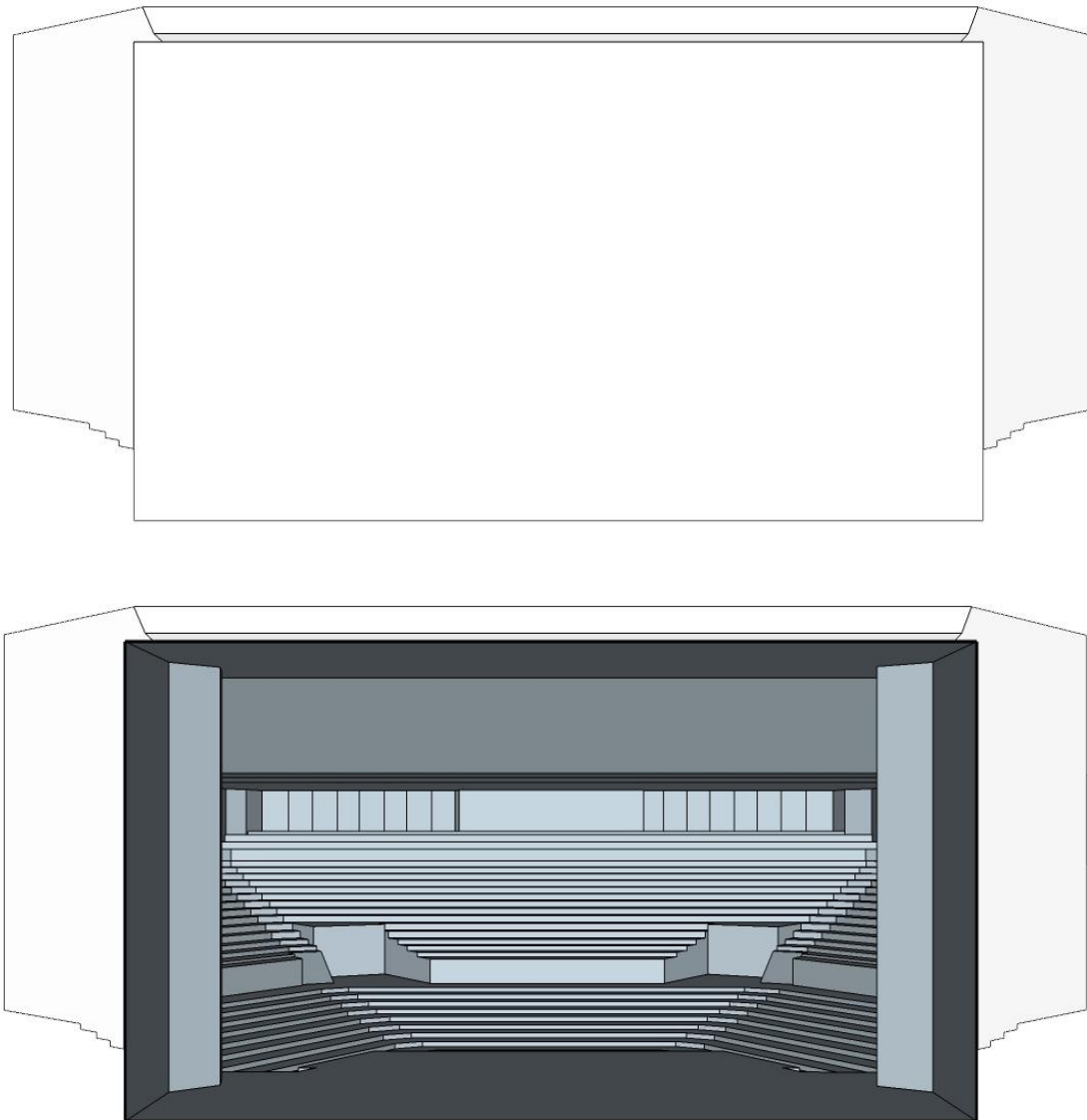


Figura 87 Levantamiento cara frontal

Elaboración propia (SketchUp)

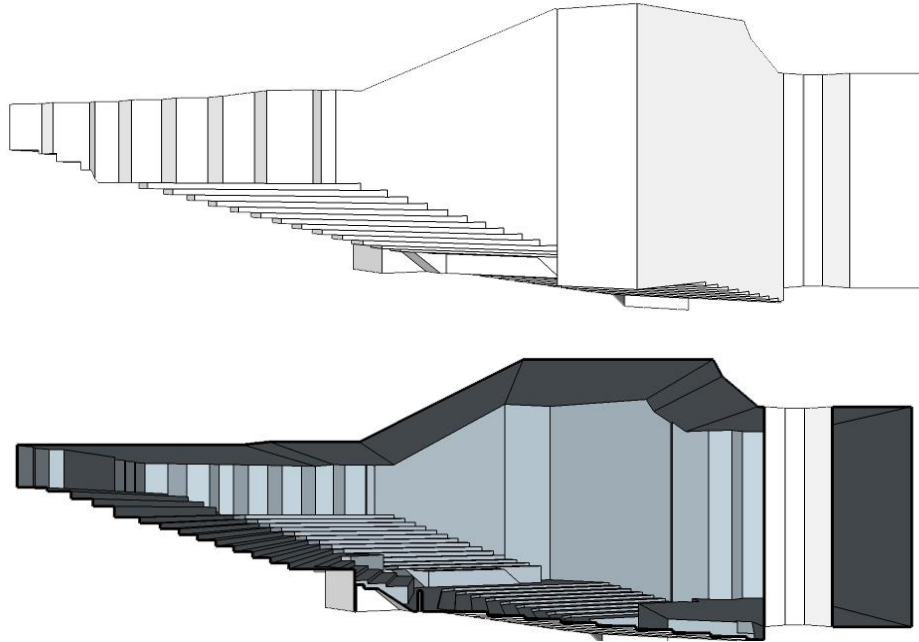


Figura 88 Levantamiento costado derecho

Elaboración propia (SketchUp)

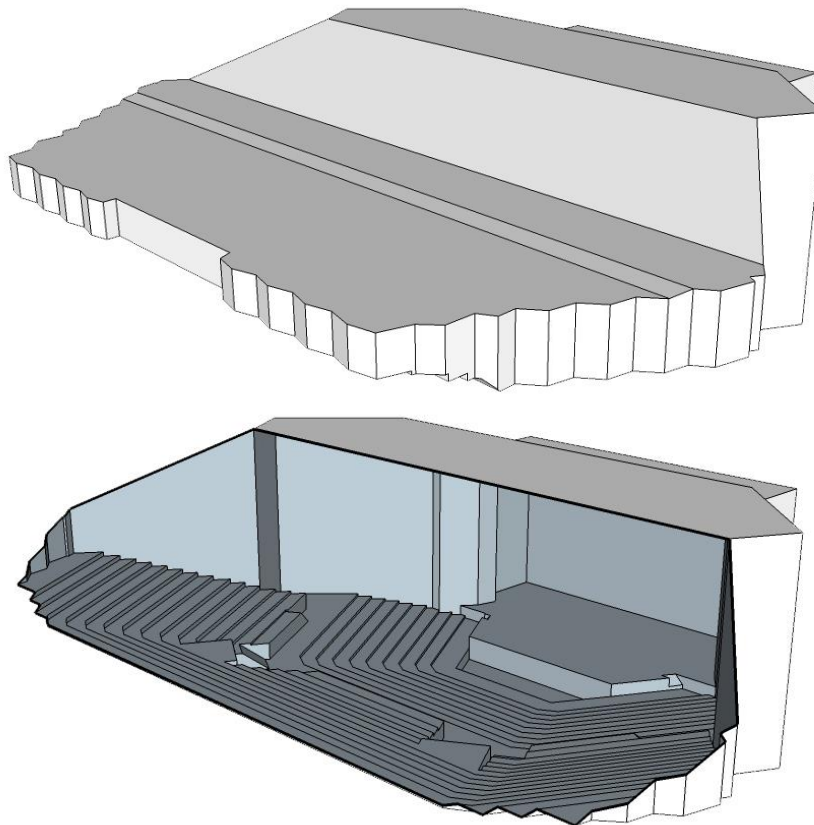


Figura 89 Levantamiento visual desde la cubierta

Elaboración propia (SketchUp)

Teniendo en cuenta los datos arrojados por el software se tiene en primera instancia que el objeto cuenta con aproximadamente 1598 caras internas las cuales son tomadas como superficies de incidencia sonora. El principal objetivo de esta etapa es conocer y poder percibir auditivamente el comportamiento de un espacio destinado como sala polivalente haciendo intervención con revestimiento de materiales.

El análisis se realizó teniendo en cuenta la conformación de los elementos perimetrales y el elemento escalonado en la cubierta con revestimiento de materiales para conocer el comportamiento del sonido y poderlo comparar con los análisis de la primera etapa.

Para esta simulación de la forma geométrica se incluyen seis tipos de materiales que conforman el revestimiento actual de la sala, el cual presenta el siguiente comportamiento de absorción. Ver tabla número 3.

Tabla 3 Coeficientes de absorción del revestimiento de materiales actuales de la sala

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN																					
Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
Paneles de madera	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Linoleum	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Cielo en madera	0,2	0,2	0,18	0,17	0,15	0,13	0,12	0,1	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Listones de madera	0,15	0,15	0,14	0,12	0,11	0,11	0,1	0,1	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Asientos tapizados	0,13	0,15	0,18	0,22	0,25	0,28	0,32	0,35	0,37	0,38	0,4	0,42	0,43	0,45	0,42	0,38	0,35	0,33	0,32	0,3	0,28
Puerta madera	0,15	0,15	0,14	0,12	0,11	0,11	0,1	0,1	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07

Elaboración propia

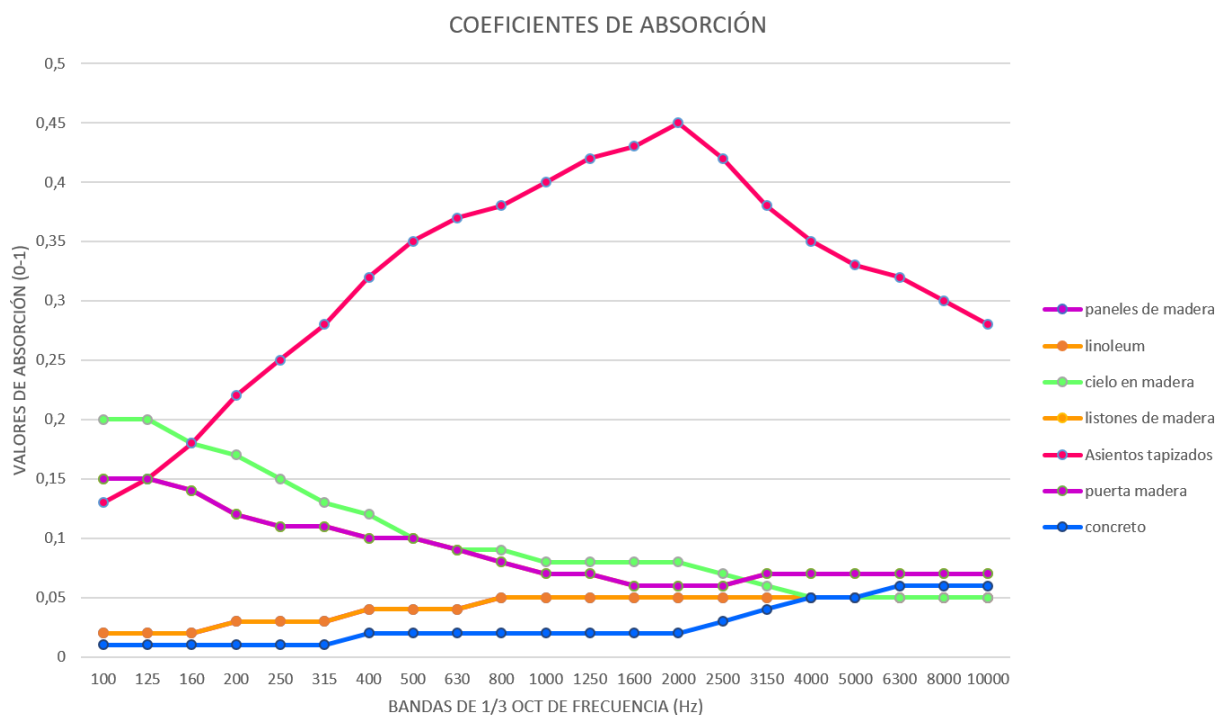


Figura 90 Coeficientes de absorción del revestimiento actual de materiales de la sala

Elaboración propia

En la figura número 90 se exponen los coeficientes de absorción de los materiales utilizados en la simulación para la estimación acústica, en la segunda etapa se puede evidenciar que estos materiales, (paneles de madera, listones de madera, linóleoum, cieloraso en madera, puertas en madera) también se comportan como reflectantes al seguir presentados valores pequeños en capacidad para absorber energía. Las sillas, por el tipo de material que poseen, presentan un coeficiente alto en absorción.

“Decimos que un material es acústico cuando tiene un promedio de absorción de 0.50 (NRC) o cuando el coeficiente de absorción a alguna frecuencia es de 0.50 o más”. (Alanís, 2012, pág. 73) según esta afirmación, el material con más coeficiente de absorción dentro de la sala del auditorio León de Greiff, son los asientos tapizados.

A. TIEMPO DE REVERBERACIÓN

En la estimación de valores de la simulación, la forma geométrica con revestimiento de materiales comprueba que el tiempo de reverberación está dentro de los rangos aconsejados para una sala polivalente. Ver tabla número 1 en donde se indica que el RT mid aconsejado para una sala polivalente esta entre 1.2 – 1.5

En la figura número 91 el tiempo de reverberación mantenido en las mismas frecuencias de 500Hz a 1000Hz presenta un comportamiento más estable para la sala. Introducir el revestimiento de materiales indica que, aunque sean en su mayoría reflectantes y no absorbentes, alcanza a generar un tiempo de reverberación de **1.47** en la frecuencia de **500Hz** y un tiempo de reverberación de **1.52** en la frecuencia de **1000Hz**.

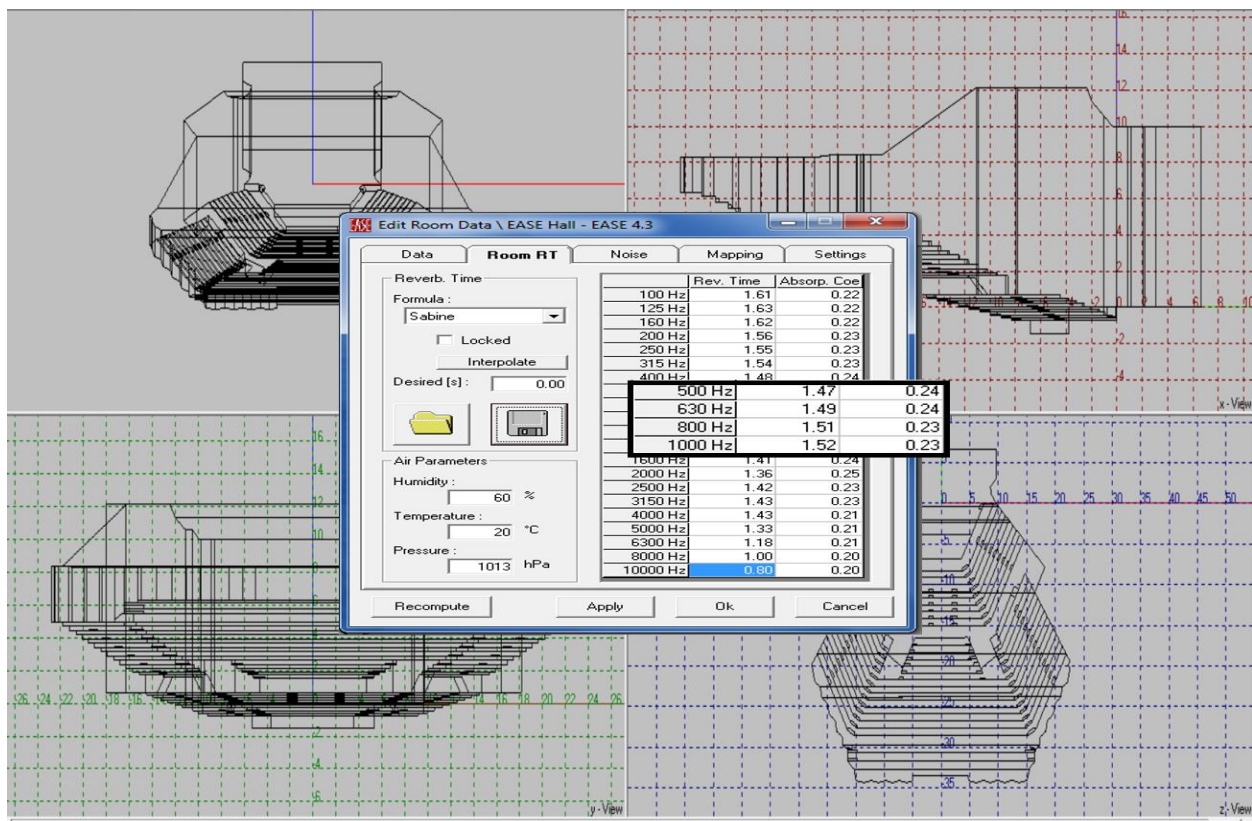


Figura 91 Tiempo de reverberación calculados por el software EASE 4.3

Elaboración propia (EASE 4.3)

B. ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (STI)

El comportamiento de la inteligibilidad de la palabra dentro de la sala con revestimiento de materiales presenta un índice de **0.72** máximo de STI en la zona más cercana al escenario y un índice de **0.5** mínimo de STI en las zonas más lejanas del escenario. Esto quiere decir que la intensidad de la señal sonora es mayor y se encuentra dentro de una sala con débil y buena inteligibilidad de la palabra, ya que sus rangos están por encima de **0.45** STI. Ver figura 92.

$STI \leq 0,3$ MALA

$0,3 \leq STI \leq 0,45$ POBRE

$0,45 \leq STI \leq 0,6$ DÉBIL

$0,6 \leq STI \leq 0,75$ BUENA

$0,75 \leq STI \leq 0,9$ EXCELENTE

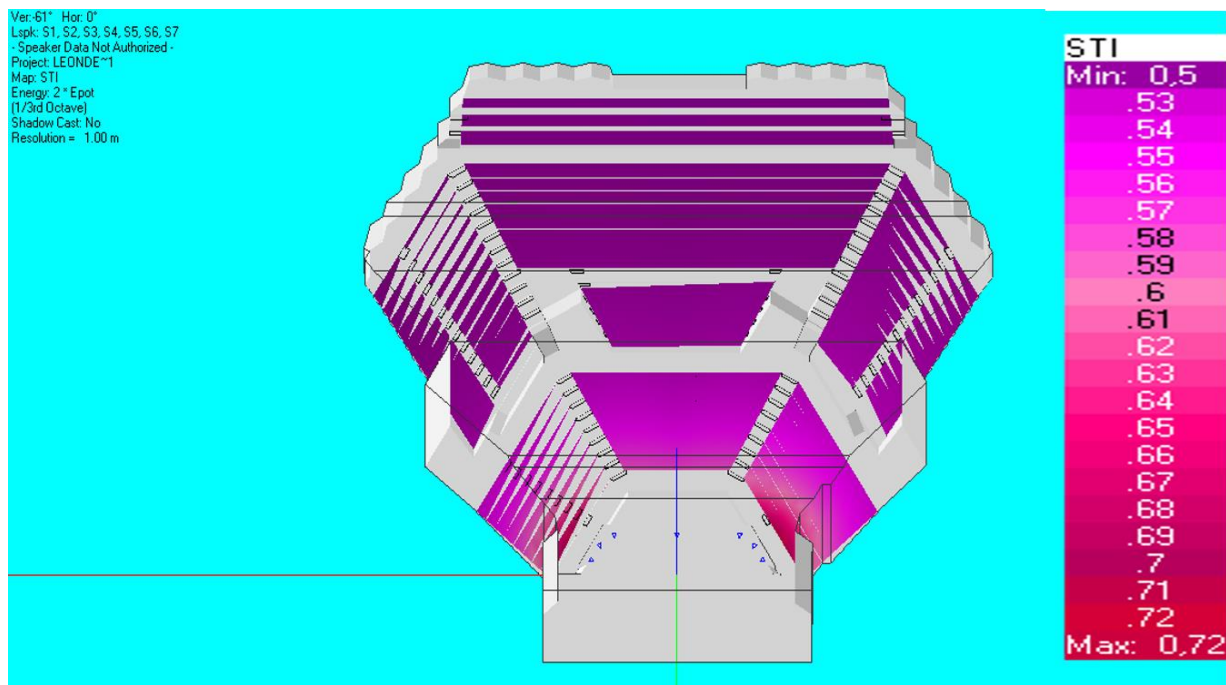


Figura 92 Índice de transmisión de la palabra calculados por el software EASE 4.3

Elaboración propia (EASE 4.3)

C. CLARIDAD MUSICAL C80

Para la sala con revestimiento de materiales, se evidencia que los rangos en decibels se encuentran en positivo y negativo, es decir que la claridad musical tiene un mejor comportamiento, pero hay que reforzar las zonas de atrás. En la zona baja, la más cercana al escenario, el rango de potencia es máximo y se encuentra en **4.91 decibels**. El resto de la sala cuenta con un rango mínimo de intensidad negativo de **-2.97 decibels**. Ver figura 93.

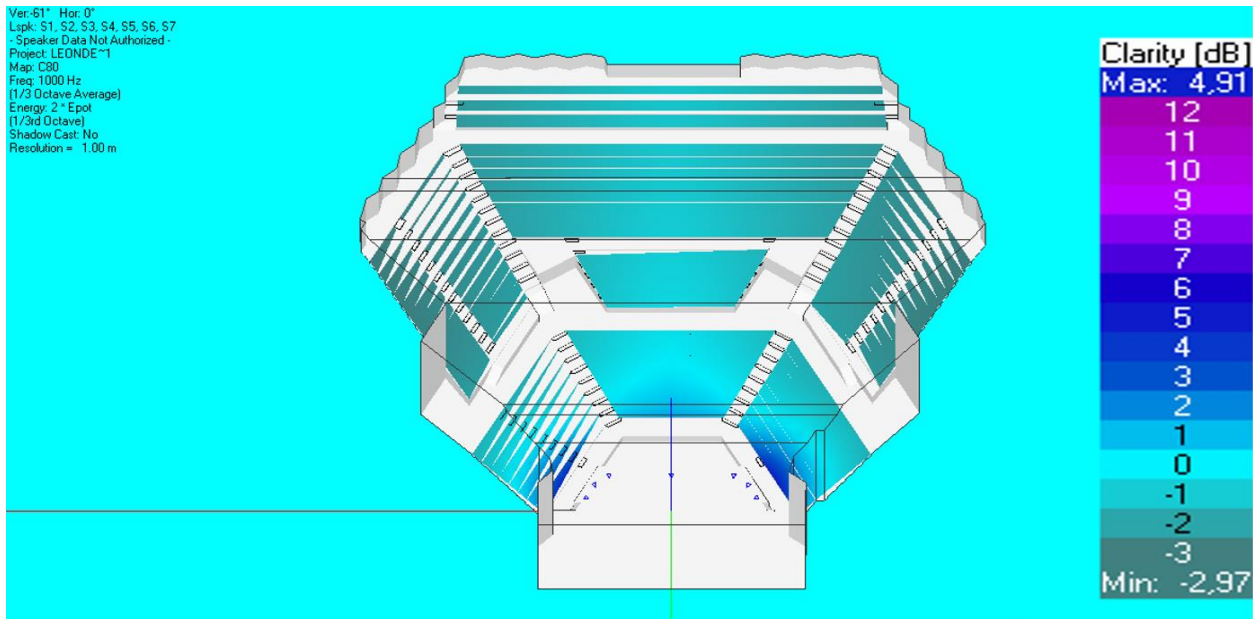


Figura 93 Claridad musical C80 calculados por el software EASE 4.3.

Elaboración propia (EASE 4.3)

D. CLARIDAD DE LA VOZ C50

En la simulación con revestimiento, la claridad de la voz C50 presenta en la zona más cerca al escenario un rango máximo de **3.47 decibeles** y la distribución para el resto de la sala presenta un rango negativo de **-7.33 decibeles**. El comportamiento de la claridad de la voz al igual que la claridad musical, presenta rangos positivos y negativos, esto quiere decir que es importante realizar una intervención para que en las zonas de atrás no exista una afectación de sonido, es decir las personas tengan un escucha mejor del mensaje. Ver figura 94.

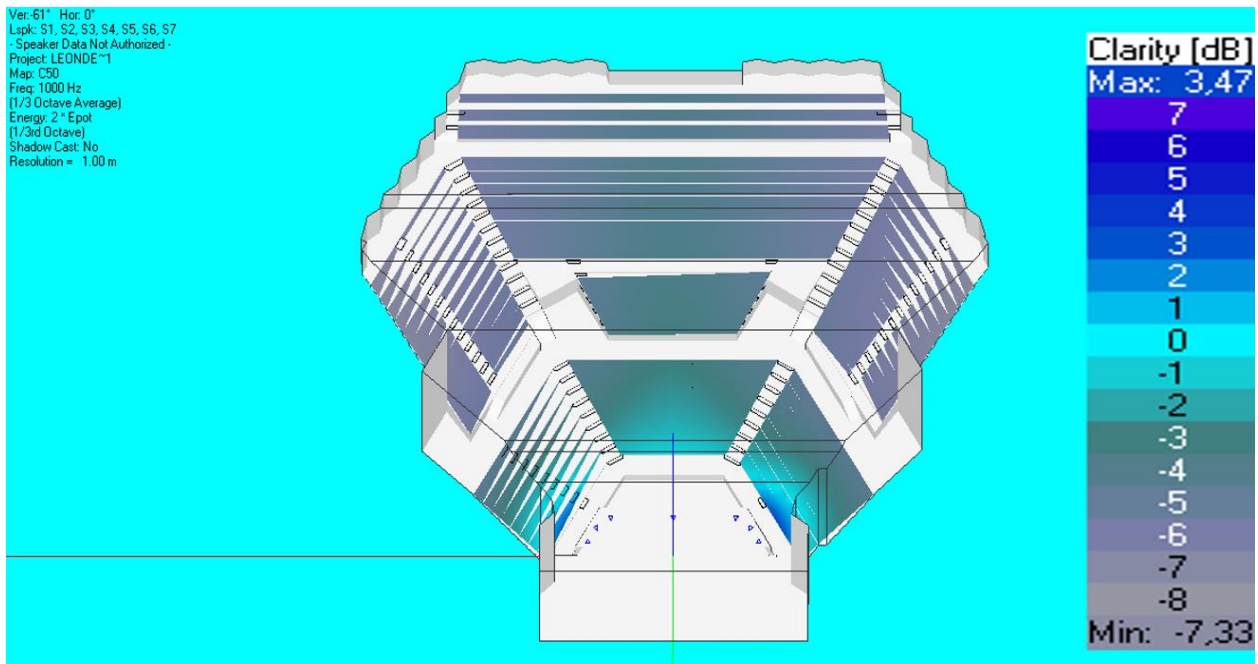


Figura 94 Claridad de la voz C50 calculados por el software EASE 4.3

Elaboración propia (EASE 4.3)

E. PERDIDA DE LA ARTICULACIÓN DE LAS CONSONANTES %ALCONS

El comportamiento de la pérdida de la articulación de las consonantes en la sala presenta en la zona más cercana al escenario un porcentaje mínimo de **3.54%** y su distribución para las zonas de atrás presenta un porcentaje máximo de **11.59%**. El comportamiento de la articulación de las consonantes para la sala con revestimiento de materiales es más estable porque sus rangos en comparación con la simulación sin revestimiento no alcanzan un porcentaje muy alto. Sin embargo, la zona de atrás sigue presentando una pequeña pérdida de la articulación. Ver figura 95.

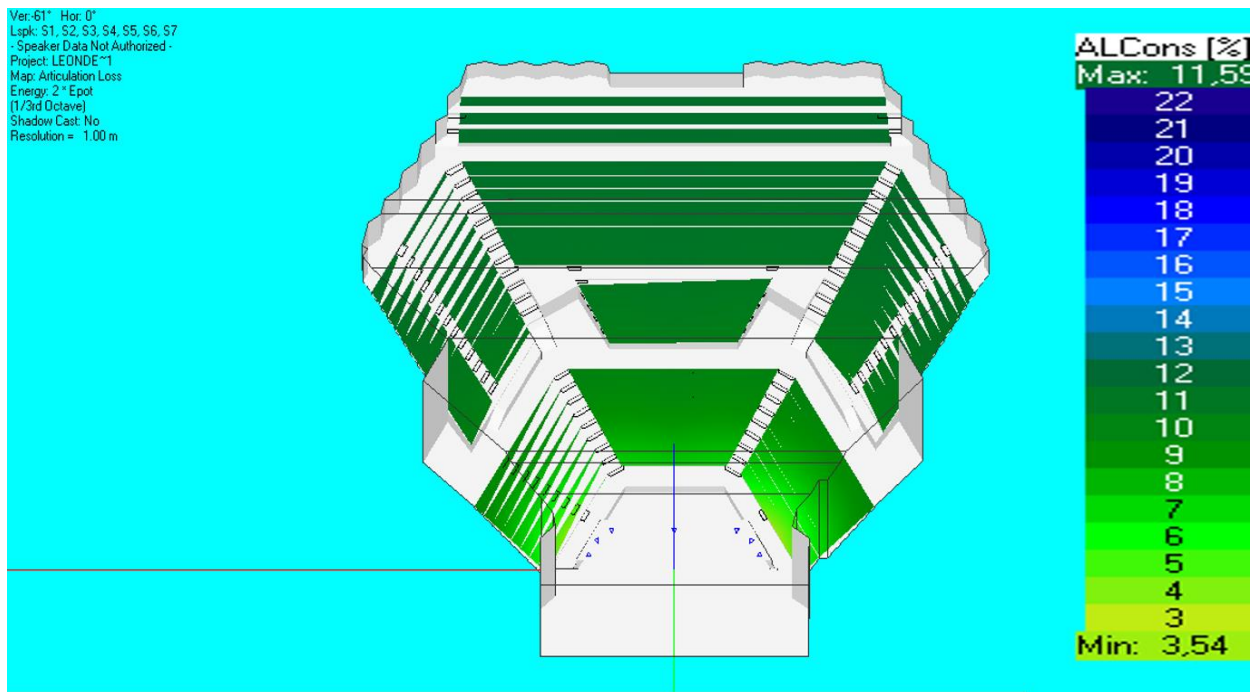


Figura 95 Articulación de las consonantes calculados por el software EASE 4.3

Elaboración propia (EASE 4.3)

F. DISTRIBUCIÓN SONORA (SPL)

Para la distribución sonora también se tiene en cuenta el uso de altavoces omnidireccionales que emitió un ruido rosa y se caracteriza por tener un nivel sonoro adecuado para el oído en todas las frecuencias. El comportamiento del nivel de la presión sonora para la sala en la zona más cercana al escenario presenta un rango máximo de **93.61 decibeles** y su distribución en las zonas de atrás presenta un rango mínimo de **89.39 decibeles**. Como se mencionó en la simulación sin revestimiento, en este parámetro la función principal es que toda la sala cuente con una distribución adecuada para la sala. La presión sonora con revestimiento sigue presentando una buena distribución en la zona más cercana al escenario y en el resto de la sala la presión presenta un comportamiento más uniforme en todos los costados. Ver figura 96.

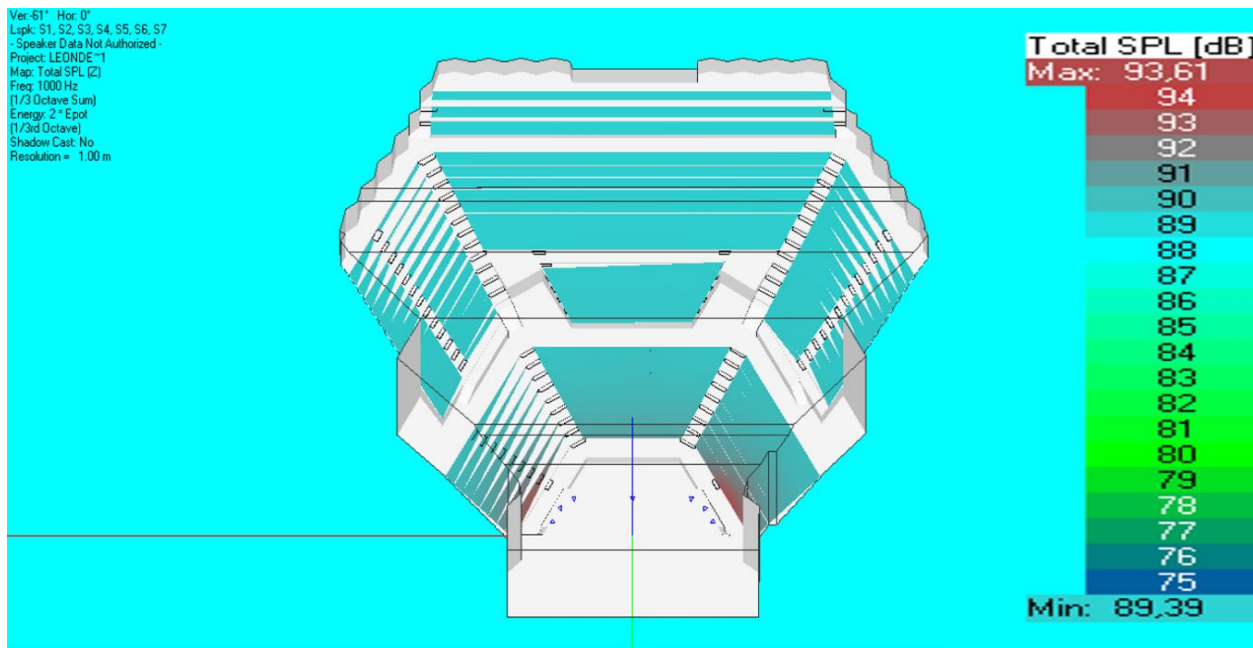


Figura 96 Distribución sonora (SPL) calculados por el software EASE 4.3

Elaboración propia (EASE 4.3)

G. AURALIZACIÓN

“El espacio se oye, se escucha y se vive sónicamente. Cuando oímos el espacio, detectamos simplemente su sonido; cuando escuchamos al espacio le ponemos atención y reaccionamos; y cuando vivimos o experimentamos auditivamente el espacio, logramos estar inmersos en él, y todo esto se convierte en una experiencia total.” (Rodríguez, 2013, pág. 158)

Dentro de la segunda etapa de análisis, se realizó la auralización de la simulación con revestimiento de materiales para poder comparar el comportamiento del sonido con la auralización que se desarrolló sin revestimiento de materiales.

Se consideró necesario realizar la prueba con revestimiento de materiales para experimentar el cambio sonoro que se produce dentro de la sala, haciendo notar como se atenúa la reverberación con revestimiento de materiales.

El resultado de la auralización con revestimiento de materiales, permite escuchar que el comportamiento del sonido dentro de la sala es mejor, se escucha que el mensaje del sonido es más claro y más entendible en la zona de audiencia. Este resultado realza la importancia a la hora de escoger de la materialidad para el óptimo comportamiento sonoro dentro de la forma geométrica.



7.3 CONCLUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS

En la tabla número 4 se muestra como se realizó una recapitulación de los rangos óptimos recomendados según la literatura consultada y los resultados de los parámetros analizados en las simulaciones realizadas que otorgaron criterios acústicos a la forma geométrica sin revestimiento de materiales y con revestimiento de materiales.

Tabla 35 Comparación de resultados acústicos

PARÁMETRO	RANGO ACONSEJADO	RESULTADO SIN REVESTIMIENTO	RESULTADO CON REVESTIMIENTO
Tiempo de reverberación	1.2 – 1.5 (dB)	20.68 – 18.67 (dB)	1.47 – 1.52 (dB)
Índice de transmisión de la palabra	$STI \leq 0,3$ MALA $0,3 \leq STI \leq 0,45$ POBRE $0,45 \leq STI \leq 0,6$ DÉBIL $0,6 \leq STI \leq 0,75$ BUENA $0,75 \leq STI \leq 0,9$ EXCELENTE	0.37 – 0.25 STI	0.72 – 0.50 STI
Claridad musical C80	Rangos positivos de la energía sonora durante los primeros 80ms	-6.92 - - 11.8 (dB)	4.91 - -2.97 (dB)
Claridad de la voz C50	Rangos positivos de la energía sonora durante los primeros 50ms	-8.12 - -16.4 (dB)	3.47 - -7.33 (dB)
Articulación de las consonantes	Valor mínimo	22.7 – 43.1 %	3.54 – 11.55 %
Nivel de presión sonora	Intensidad del sonido en (dB)	85.67 – 63.07 (dB)	93.61 – 89.39 (dB)

Elaboración propia con base a los resultados obtenidos en las simulaciones del modelo

Comparar los resultados de los parámetros analizados, muestra el proceso del comportamiento del sonido cuando la sala no posee un revestimiento de materiales adecuados y como mejora el comportamiento del sonido cuando se añade un revestimiento de materiales idóneos para adecuar acústicamente la forma geométrica de la sala.

Los resultados del tiempo de reverberación son un acercamiento en la simulación para ver cómo se comporta la sala del auditorio, según comparación con los rangos aconsejados, muestra que la sala cuando no tiene revestimiento de materiales, se convierte en un volumen en donde el comportamiento del sonido no es óptimo. Este resultado indica que la sala debe contar con un revestimiento de materiales para que el comportamiento del sonido sea más adecuado dentro del espacio. Se comprueba dentro de la simulación que, al introducir los materiales actuales, el tiempo

de reverberación cambia y llega a posicionarse dentro de los rangos aconsejados, esto genera un espacio adecuado para realizar las actividades destinadas dentro de la sala.

Comparar los resultados de la simulación con el índice de transmisión de la palabra, indica por un lado que sin revestimiento de materiales la sala se encuentra en un rango malo pobre y al introducir el revestimiento de materiales obtiene un rango débil bueno. Esto indica que, aunque la sala ya tenga un tiempo de reverberación adecuado, el parámetro del índice de transmisión está presentando una falencia dentro de la sala porque su comportamiento no alcanza a tener un rango bueno excelente.

De igual manera pasa con los parámetros C80 Y C50, articulación de las consonantes y distribución sonora, los resultados con revestimiento de materiales siguen presentando un rango que no se acerca a lo aconsejado, es por esto que, en algunas zonas de la sala, el comportamiento del sonido no llega a ser completamente óptimo. Esto revela que dependiendo de la actividad que se realice dentro de la sala, sus falencias deben ser solucionadas a partir de un acompañamiento tecnológico de micrófonos, altavoces y consolas.

Por otro lado, realizar la simulación con el revestimiento actual de la sala, evidencia que los materiales escogidos funcionan para que el comportamiento del sonido sea adecuado dentro de la sala, sin embargo, el comportamiento del sonido presentan algunas falencias y esto puede relacionarse al año de construcción del auditorio, en donde para ese entonces el tema acústico y el tema del tratamiento para los materiales acústicos no contaba con un apoyo tecnológico, como el que existe actualmente.

El 80% de la sala cuenta con un revestimiento de paneles o listones de madera en sus elementos perimetrales y en el elemento superior, esto ayuda a mejorar el comportamiento del sonido dentro de la sala porque la ubicación y el posicionamiento de los listones de madera reflejan el sonido en más direcciones y esto hace que el sonido se distribuya mejor en la sala. Sin embargo, aunque ayude a que el sonido tenga una mejor distribución, al conocer el coeficiente de absorción, se expone que es un material más reflejante que absorbente, por lo que el material que más ayuda en la absorción del sonido son los asientos tapizados. Esto podría soportar dentro de los estudios, que la forma geométrica puede reforzarse mejor cuando el revestimiento de materiales se escoge adecuadamente para que la conformación de la forma geométrica tenga mejores resultados acústicos.

De acuerdo a estas conclusiones, aunque la sala presente algunos problemas con el comportamiento del sonido, también cuenta con características acústicas que permiten tener un espacio adecuado para las personas. Es por esto, que se introducen unos consejos básicos que se toman de (Isbert, 1998) y (López, 1999) recomendando realizar unas mediciones acústicas en sitio para comparar los resultados con la simulación acústica y verificar el comportamiento del sonido en un estado simulado y en un estado real, mejorar el revestimiento de materiales, ya que actualmente, los materiales acústicos presentan un mejor desarrollo en su composición para reflejar, absorber y difundir el sonido adecuadamente dentro de un espacio. Por último, realizar un refuerzo sonoro para la sala, incluyendo micrófonos, altavoces y consolas de sonido con desarrollo tecnológico actual para la sala.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

“Como arquitecto he estado muy consciente del diálogo intenso y recíproco que a menudo se da entre lo audible y lo visible. Los edificios no solo ofrecen espacios para vida, sino que también son instrumentos de facto, dando forma al sonido del mundo. La música y la arquitectura están relacionadas no sólo por la metáfora, sino también a través del espacio concreto... En el imperial War Museum North en Trafford, Manchester, he creado una relación entre la atmósfera de los distintos componentes del edificio y un “paisaje sonoro” particular. La composición del edificio es una experiencia de cuatro movimientos... La arquitectura sólo puede ser apreciada por la transformación del tamaño en la escala, del material en la luz, y del tiempo en el ritmo, el color y la tonalidad. Sin música, la arquitectura desaparecería por completo. La reducción de la arquitectura a una realidad material sirve sólo para crear una ciudad del ruido” (Libeskind 2002).” (Rodríguez, 2013, pág. 143)

Los parámetros para entender la forma y los parámetros físicos para otorgar criterios acústicos a la forma, como se mencionó anteriormente, se analizaron desde dos puntos de vista. Uno, sin revestimiento de materiales y otro con revestimiento de materiales. Dentro de esta investigación estos dos puntos de vista fueron la mejor manera para determinar la dependencia que existe entre la forma geométrica, la acústica y el revestimiento de materiales para conformar un todo.

La forma geométrica de la sala sin revestimiento de materiales demostraba que su conformación generó un volumen muy grande para ser habitado y adecuarlo con actividades escenográficas. Su creación desde un principio mostraba que su función se centraba en contar con un espacio acústico y arquitectónico. La forma geométrica de la sala del auditorio León de Greiff sin revestimiento de materiales compuso un espacio con elementos que caracterizaron el espacio de acuerdo a las recomendaciones para diseñar una sala polivalente. Ver figura 97.

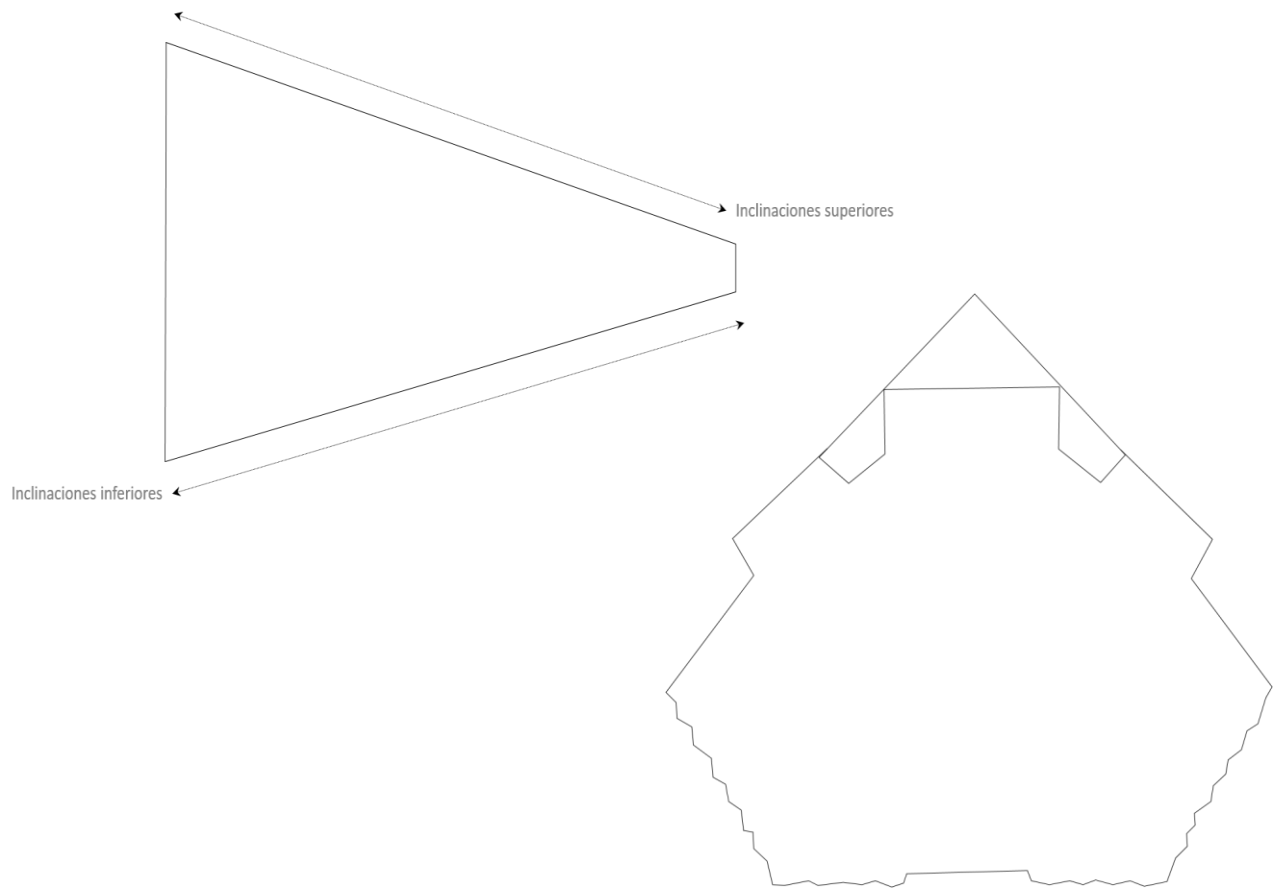


Figura 97 Corte y planta de la forma geométrica

Elaboración propia

La forma geométrica expone desde el principio que en corte el volumen cuenta con inclinaciones superiores e inferiores y en planta cuenta con quiebres perimetrales. Poner esta geometría en comparación con los resultados de la simulación sin revestimiento de materiales expone que los parámetros físicos conciben una sala polivalente sin características acústicas, pues todos sus resultados no son acordes a los rangos aconsejados, exponiendo un problema del comportamiento del sonido sobre todo en la zona media y alta de la sala. Ver figura 98.

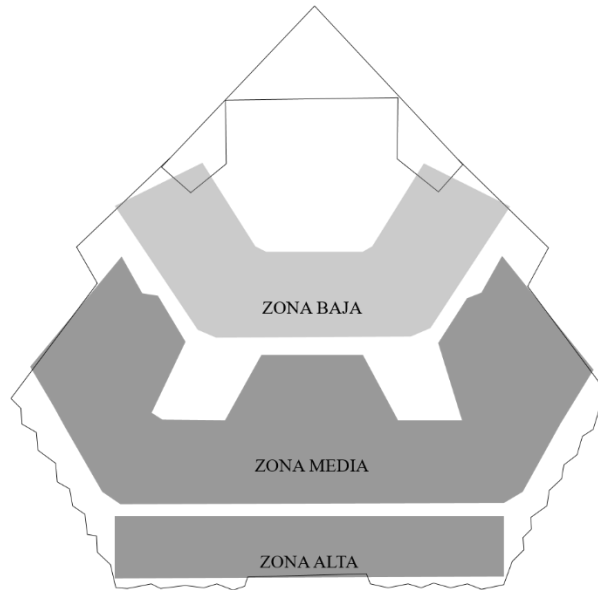


Figura 98 Afectaciones por zonas del comportamiento del sonido sin revestimiento de materiales

Elaboración propia

El espacio cumple con características para la forma geométrica, pero acústicamente no mostraba que fuera el más adecuado. Fue por esto que se simuló el revestimiento de materiales actuales de la sala para mirar su comportamiento. Esto determinó que la forma geométrica dependía del revestimiento de materiales para que el comportamiento acústico fuera más acorde a la forma y se mitigaran los problemas que se presentaban en la sala sin revestimiento. Ver figura 99.

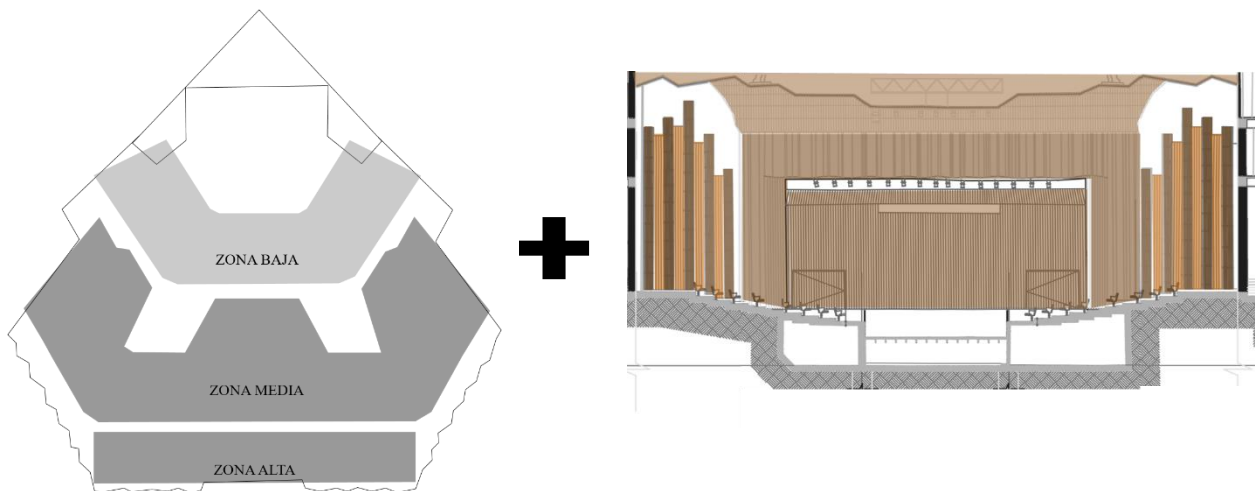


Figura 99 Geometría + revestimiento de materiales

Elaboración propia

La simulación con revestimiento de materiales expone que el comportamiento del sonido tiene un cambio y los parámetros físicos se acercan un poco más a los rangos deseados. Los resultados de la simulación con revestimiento de materiales indica que, en la zona baja, y en la zona central del medio el comportamiento del sonido es mejor, aunque perimetralmente en la zona del medio y en la zona de atrás presente falencias. Ver figura 100. No obstante, de acuerdo al año de construcción la sala del auditorio León de Greiff cuenta con un espacio adecuado arquitectónica y acústicamente.

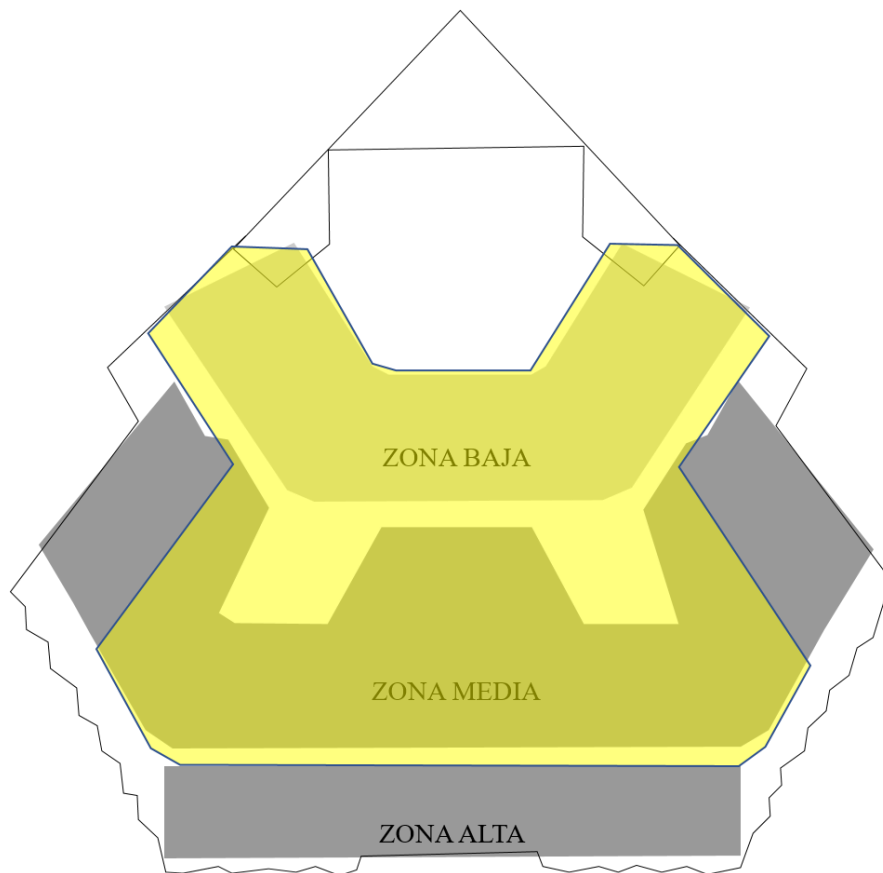


Figura 100 Comportamiento del sonido en la geometría por zona con revestimiento de materiales

Elaboración propia

Estos resultados crearon una triangulación en donde se muestra la agrupación que existe entre la forma y la acústica para relacionar la forma, la acústica y el revestimiento de materiales. Ver figura 101 y 102.

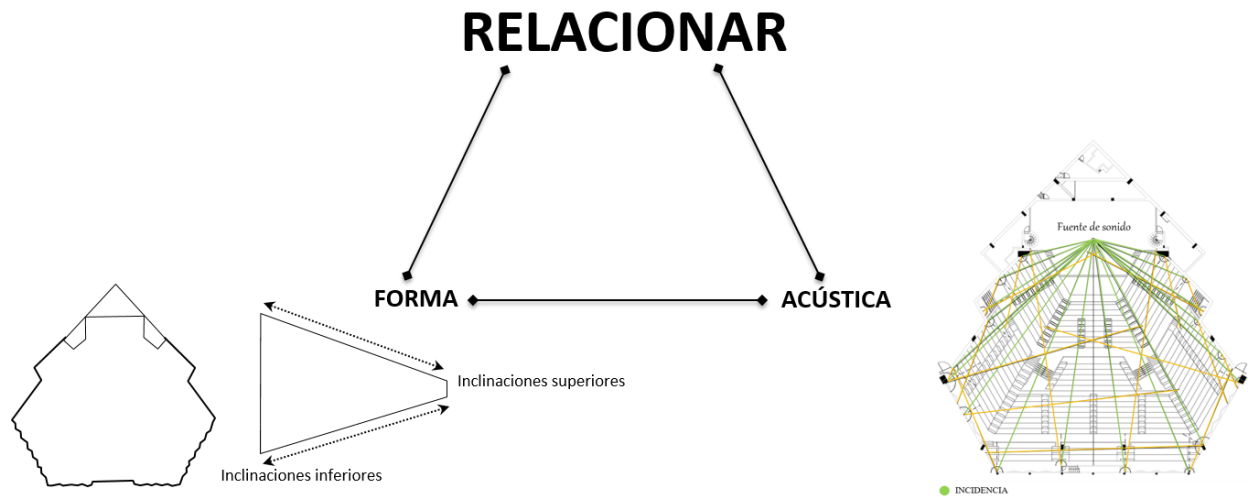


Figura 101 Relación entre forma y acústica

Elaboración propia

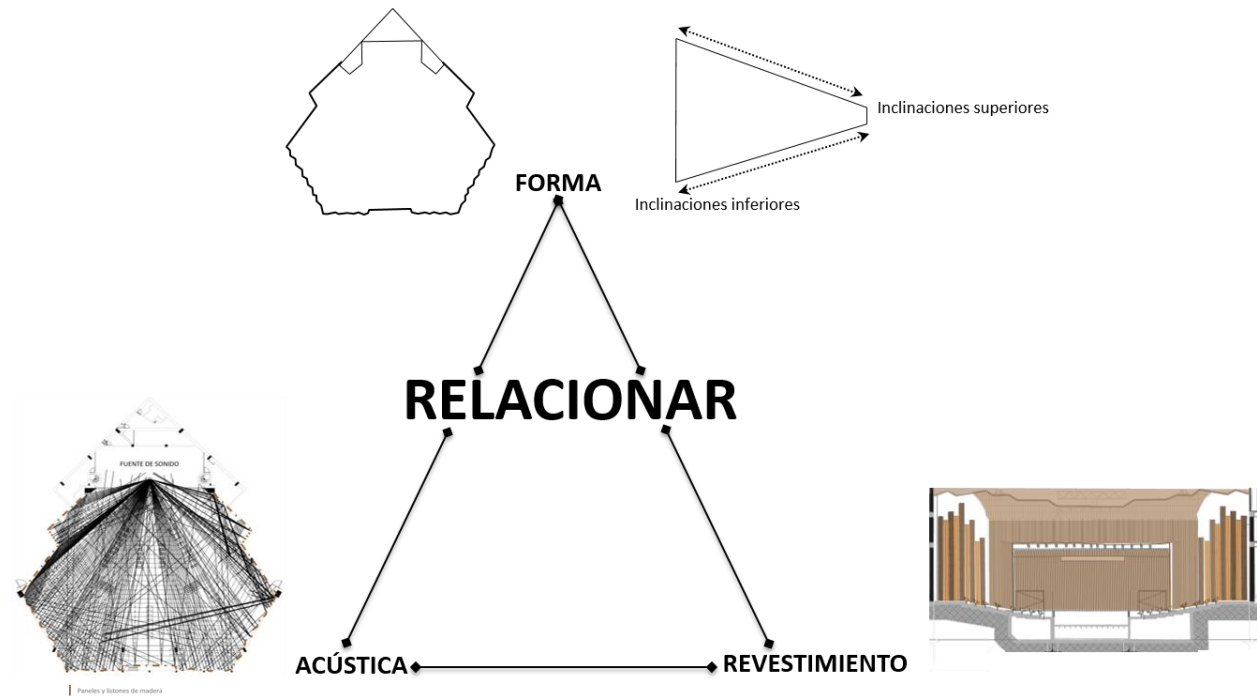


Figura 102 Relación entre forma, acústica y revestimiento de materiales

Elaboración propia

Relacionar la forma, la acústica y el revestimiento determina la dependencia que existe entre cada una, para que la proyección sea completamente adecuada. Esta relación da respuesta a la funcionalidad que existe a la hora de agrupar la geometría, la acústica y el revestimiento ya que se demuestra la combinación armónica de cada elemento interno de la sala. Ver figura 103.

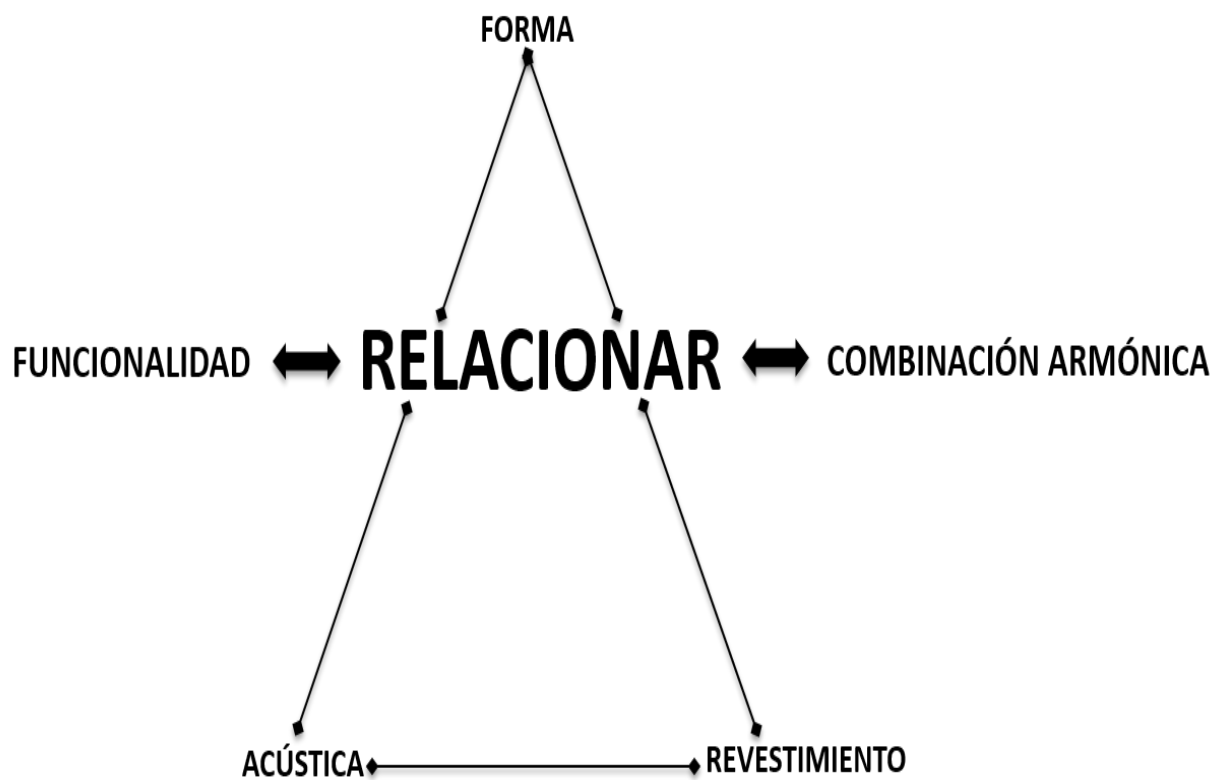


Figura 103 Relación completa

Elaboración propia

9. CONCLUSIÓN

COMPOSICIÓN UNIFICADA

La composición es el ejercicio que permite tomar decisiones en el procedimiento para crear una proyección arquitectónica. Componer, constituye con cuidado y atención la funcionalidad de juntar, distribuir y ordenar la unión entre elementos o piezas que conforman un solo objeto. Su ingenio permite combinar armónicamente la relación que debe existir entre un sistema estructural, espacial, y formal, con un todo.

“La composición se asume como disciplina analítica, es decir, como un instrumento que permite comprobar unos saberes verificables. Se presenta como práctica que se ocupa de mecanismos de diseño para obtener soluciones coherentes a problemas formales que ya han sido planteados y resueltos en los propios edificios”. (Rojas Quiñones, 2015, pág. 55)

Por otro lado, la unificación, es la acción conjunta que mezcla, iguala, enlaza, une y combina, muchas cosas para crear una sola unidad. Unificar en la arquitectura, permite manipular la funcionalidad de un elemento para demostrar que juntos pueden integrarse mejor.

La composición unificada en esta investigación quiere reconocer el concepto como cualidad básica e importante de toda proyección, ya que es fundamental llegar a una comprensión total de cómo se puede componer y unificar los conceptos que van a caracterizar un proyecto arquitectónico.

Lo anterior implica, que, para esta investigación, relacionar la forma, la acústica y el revestimiento, es la acción de componer un espacio donde se unificaron estos tres elementos como un todo, ya que la toma de decisiones para componer y unificar ordena las características funcionales y armónicas de la geometría, el sonido y el revestimiento para obtener un resultado coherente en la proyección de la arquitectura para actividades musicales y escenográficas.

La composición unificada para la sala del auditorio León de Greiff, empieza a partir de las definiciones, las descripciones y las identificaciones que caracterizaron los parámetros para entender la forma geométrica y los parámetros físicos para otorgar criterios acústicos a la forma geométrica. El marco teórico unifico los conceptos que determinaron la dependencia que existe entre la forma geométrica, el comportamiento del sonido y el revestimiento de materiales, mostrando a través del método exploratorio analítico la relación del orden, de la funcionalidad y de la coherencia en la proyección para la sala del Auditorio León de Greiff.

Entender el comportamiento de la forma geométrica y el comportamiento del sonido como una forma para proyectar arquitectura, no parece interesante para todas las personas. Sin embargo, tener presente la composición unificada del comportamiento de la geometría y del sonido, es un atributo importante a la hora de proyectar cualquier tipo de espacio. No solamente los auditorios, salas polivalente o teatros.

El término composición unificada, adquiere importancia cuando la definición estructura la relación de los elementos que dependen el uno del otro. La proyección del espacio interno empieza a depender de una forma, de unos elementos, de unos materiales, de un aspecto físico y cada uno termina tomando una virtud funcional en su agrupación.

El marco teórico y el método exploratorio analítico, demuestran una conclusión satisfactoria en la composición unificada entre la forma geométrica y la acústica arquitectónica porque en su agrupación constituyeron un lenguaje de dependencia la una con la otra. Este análisis revela como la forma y el sonido generan una operación compositiva para asimilarlo como un todo completo.

La aplicación de la acústica en la arquitectura traduce el significado de las proyecciones, en componer espacios para el ser humano, en donde los sentidos auditivos y visuales se sientan cómodos por la optimización de un sonido y una visual clara de todos los ángulos.

Realizar el proceso de la metodología de acuerdo a lo estipulado, logró dentro de la investigación demostrar y responder la pregunta problema que se planteó dentro del tema de investigación.

De igual manera, realizar el análisis acústico por medio de una simulación, demuestra que el uso de herramientas tecnológicas puede ser de gran ayuda para realizar un estudio previo a proyecciones que lleguen a ser construidas porque se puede visualizar cómo serían las características arquitectónicas y acústicas de un proyecto.

El desarrollo de esta investigación, fue un constante aprendizaje, para interpretar por medio de un documento, el significado y la importancia de la acústica arquitectónica en la arquitectura. Es además una invitación para los arquitectos a tener en cuenta el comportamiento del sonido como un factor importante a la hora de diseñar, crear y dar forma a un espacio.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Alain Borie, P. M. (2008). *Forma y deformación de los objetos arquitectónicos y urbanos*. Barcelona: Reverté, SA.
- Alanís, J. M. (2012). *Acústica en espacios y en los volúmenes Arquitectónicos*. México: Trillas, S.A de C.V .
- Arís, C. M. (2014). *Las variaciones de la identidad ensayo sobre el tipo en arquitectura*. Barcelona: Fundación Arquia .
- Arozemendi, L. J. (1980). *Tratado fundamental de acústica en la edificación*. España: Universidad de Navarra.
- Barón, F. F. (28 de 06 de 2013). *EL TIEMPO*. Obtenido de EL TIEMPO:
<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12899917>
- Barrera, C. (2017). *Revista credencial*. Obtenido de Revista credencial :
<http://www.revistacredencial.com/credencial/noticia/personajes/eugenia-mantilla-de-cardoso-la-arquitecta-del-leon-de-greiff>
- Binggeli, F. D. (2011). *Diseño de interiores un manual*. Barcelona: 2011.
- Colombia, U. N. (s.f.).
- Cosme, A. M. (2008). *El proyeco de Arquitectura*. Barcelona : Reverté, SA .
- D.K Ching, F. (1982). *ARQUITECTURA: forma, espacio y orden*. Mèxico: G.GILI S.A. .
- Diez, G. R.-J. (s.f.). Introducción a la acústica arquitectónica fundamentos físicos. Acondicionamiento. Aislamiento . *TECTÓNICA 14* , 5.
- Elam, K. (2014). *La geometría del diseño*. Barcelona: Gustavo Gili, SL .
- Federico, M. (2006). *Acústica y sistemas de sonido*. Rosario: UNR editora.
- Francis D.K.Ching, C. B. (2015). *Diseño de interiores Un manual*. Barcelona: Gustavo Gili .
- Frasquet, J. M. (2010). *Aislamiento y Acondicionamiento Acústico de un Auditorio para Actuaciones en Directo de Bandas de Música*. Gandia: Universidad Politecnica de Valencia .
- García, J. R. (2011). *Construir como arquitectura una introducción a la materialidad arquitectónica*. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U .
- Graciela Roselló Vilarroig, J. M. (2002). Introducción a la acústica arquitectónica fundamentos físicos. Acondicionamiento. Aislamiento. *TECTONICA N°14*, 4-27.

- Isbert, A. C. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos* . Barcelona: UPC.
- J Llinares, A. L. (2008). *Acústica arquitectónica y urbanística* . Valencia, España: Limusa S.A .
- López, M. R. (199). *Acústica arquitectónica aplicada*. Madrid España: Paraninfo .
- Pallasmaa, J. (2014). *Los ojos de la piel la arquitectura y los sentidos*. Barcelona: Gustavo Gili, SL.
- Restrepo, M. G. (2011). *El espacio de la música*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia .
- Roa, A. S. (2002). *LA ARQUITECTURA COMO EXPERIENCIA* . Bogotá, Colombia: Villegas Editores S. A. .
- Rodríguez, F. E. (2013). *Espacio, sonido y arquitectura Una reflexión teórica acerca del carácter acústico del espacio arquitectónico* . México: Limusa.
- Rojas Quiñones, P. (2015). *Aprendizaje, composición y emplazamiento en el proyecto de arquitectura un diálogo entre las aproximaciones analógica y tipológica*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- saber, G. d. (13 de Septiembre de 2016). *unradio.unal.edu.co*. Obtenido de unradio.unal.edu.co: <http://unradio.unal.edu.co/nc/detalle/cat/gestores-del-saber/article/gestora-del-auditorio-leon-de-greiff-maria-eugenia-mantilla-de-cardozo-2.html>
- saber, G. d. (06 de Septiembre de 2016). *unradio.unal.edu.co*. Obtenido de unradio.unal.edu.co: <http://unradio.unal.edu.co/nc/detalle/cat/gestores-del-saber/article/gestora-del-auditorio-leon-de-greiff-maria-eugenia-mantilla-de-cardozo.html>
- Villarreal, E. L. (1988). *Acústica para Arquitectos*. Monterrey, México: Universidad Regiomontana .
- Viqueira, R. (2001). *Introducción a la Arquitectura Bioclimática*. México D.F : Limusa, S.A .
- Weston, R. (2003). *Materiales, forma y arquitectura* . Barcelona: Art Blume, S. L. .

11. ANEXOS

ANEXOS 1 PLANIMETRÍA DEL AUDITORIO LEÓN DE GREIFF

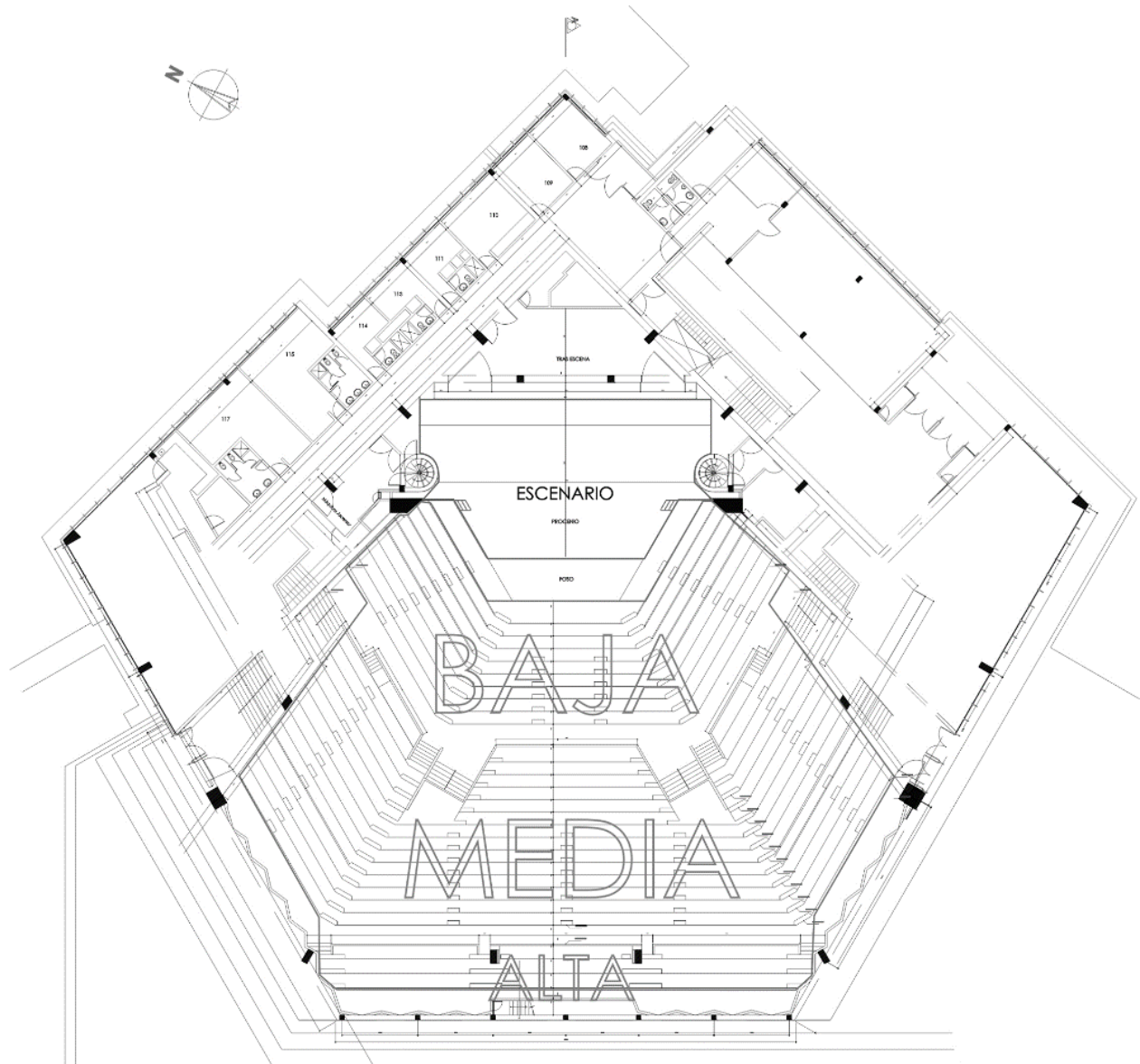


Figura 104 Planta arquitectónica (incluye la sala)

Fuente: (Colombia)

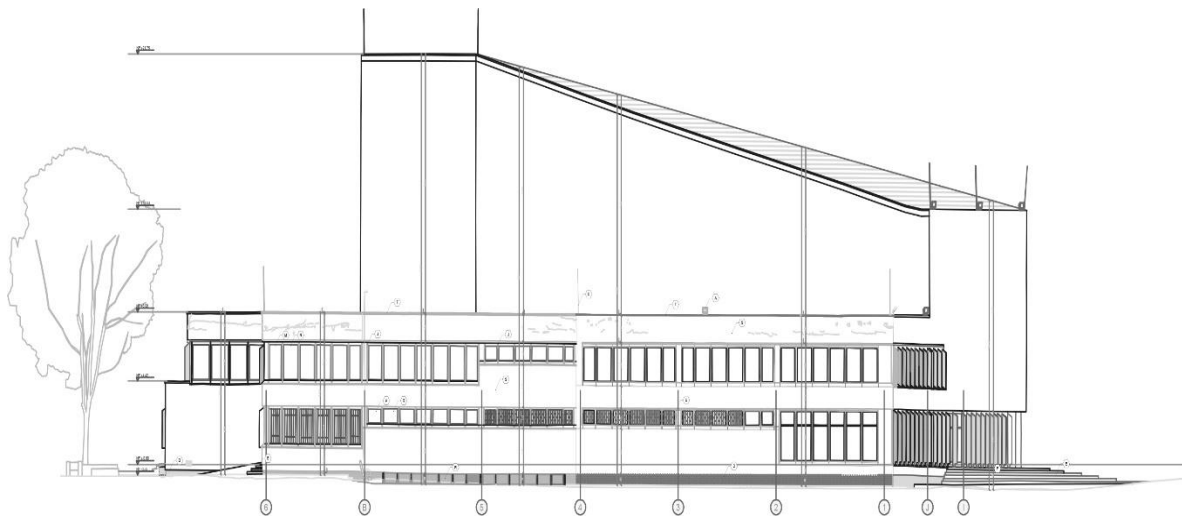


Figura 105 Fachada norte

Fuente: (Colombia)

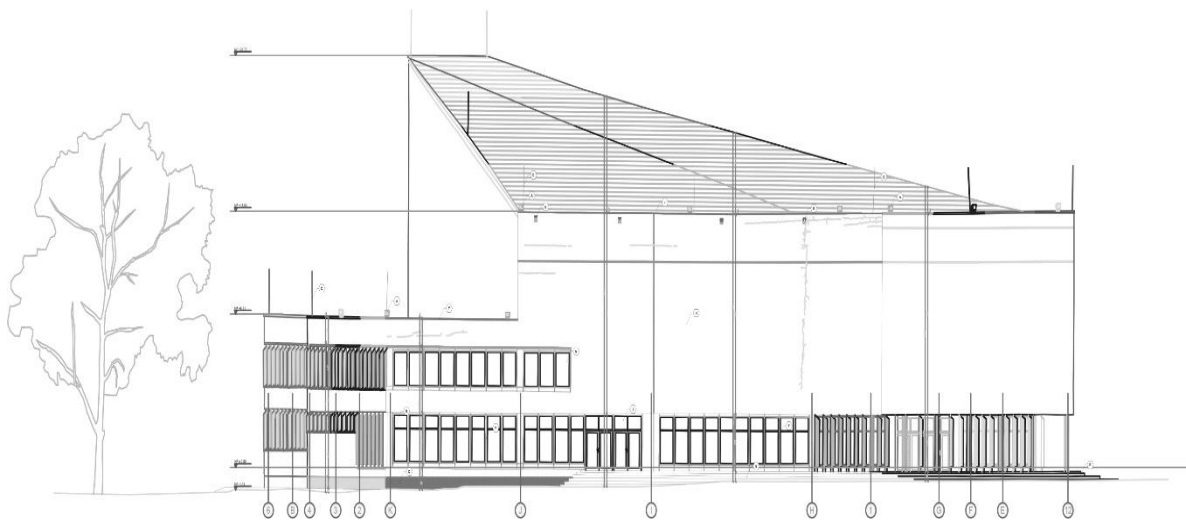


Figura 106 Fachada occidental

Fuente: (Colombia)

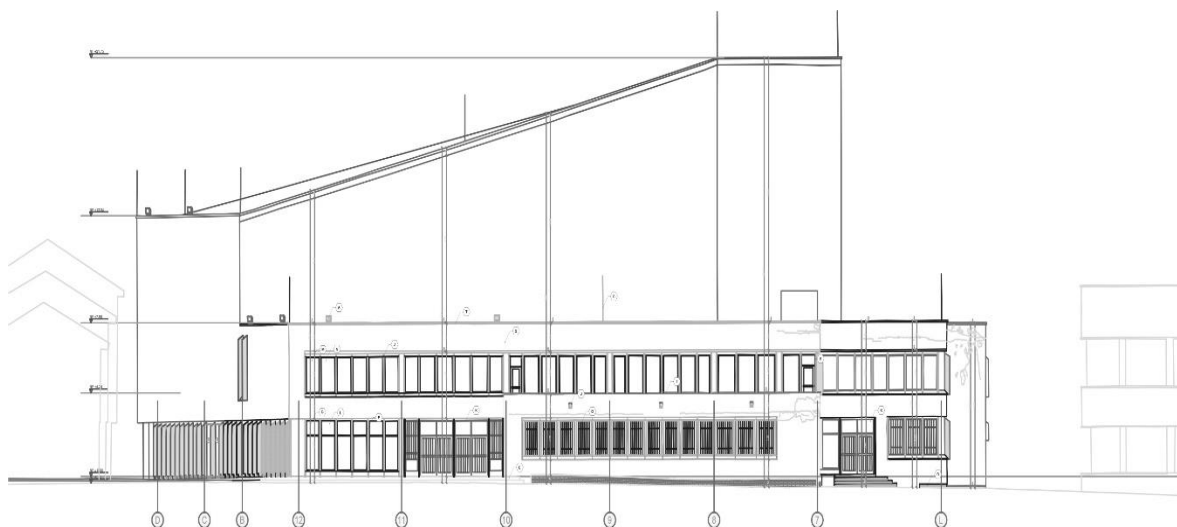


Figura 107 Fachada oriental

Fuente: (Colombia)

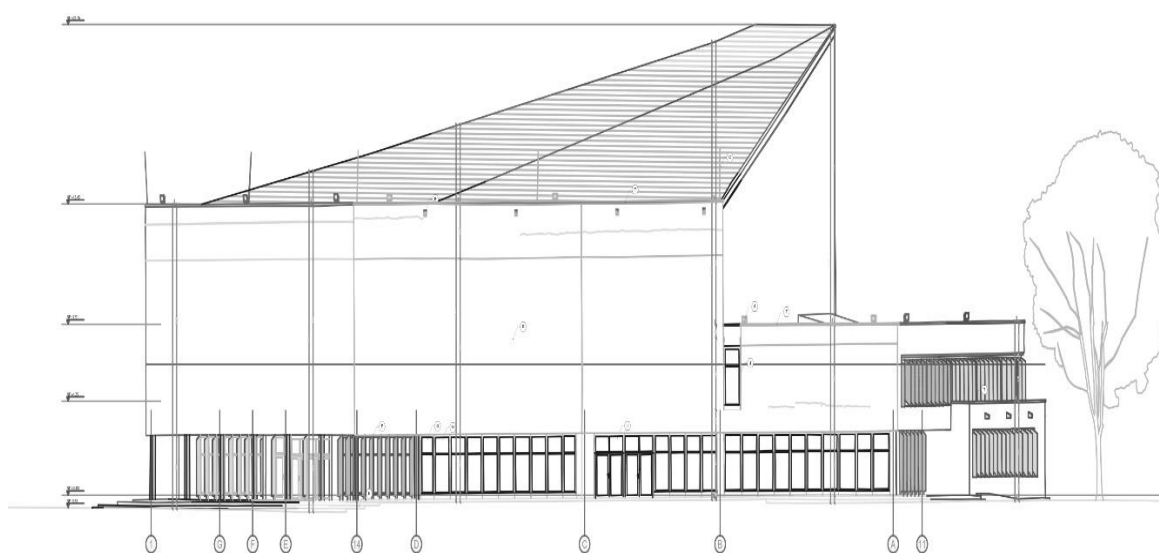


Figura 108 Fachada sur

Fuente: (Colombia)

ANEXO 2 FOTOGRAFÍAS DEL AUDITORIO LEÓN DE GREIFF



Figura 109 Auditorio León de Greiff
Elaboración propia



Figura 110 Auditorio León de Greiff

Elaboración propia



Figura 111 Auditorio León de Greiff

Elaboración propia



Figura 112 Auditorio León de Greiff

Elaboración propia

ANEXO 3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES QUE CARACTERIZAN EL SONIDO

EL RUIDO

“Es un grupo de sonidos compuestos por diferentes frecuencias no armonizadas entre sí, que a todos nos molesta sin saber por qué”. (Villarreal, 1988, pág. 8)

El ruido, es la generación de varias frecuencias a diferentes intensidades y amplitudes. Al igual que el sonido, es percibido por un receptor, pero en este caso, son sonidos que pueden llegar a ser molestos para el oído humano. Según la Real Academia Española el ruido es, *“Sonido inarticulado, por lo general desagradable”*. La OMS (Organización mundial de la salud) demuestra que el ruido es uno de los mayores contaminantes con efectos negativos para la salud. En la figura número 113, se observan algunos elementos que generan ruido dentro de una ciudad y pueden afectar espacios abiertos y cerrados.

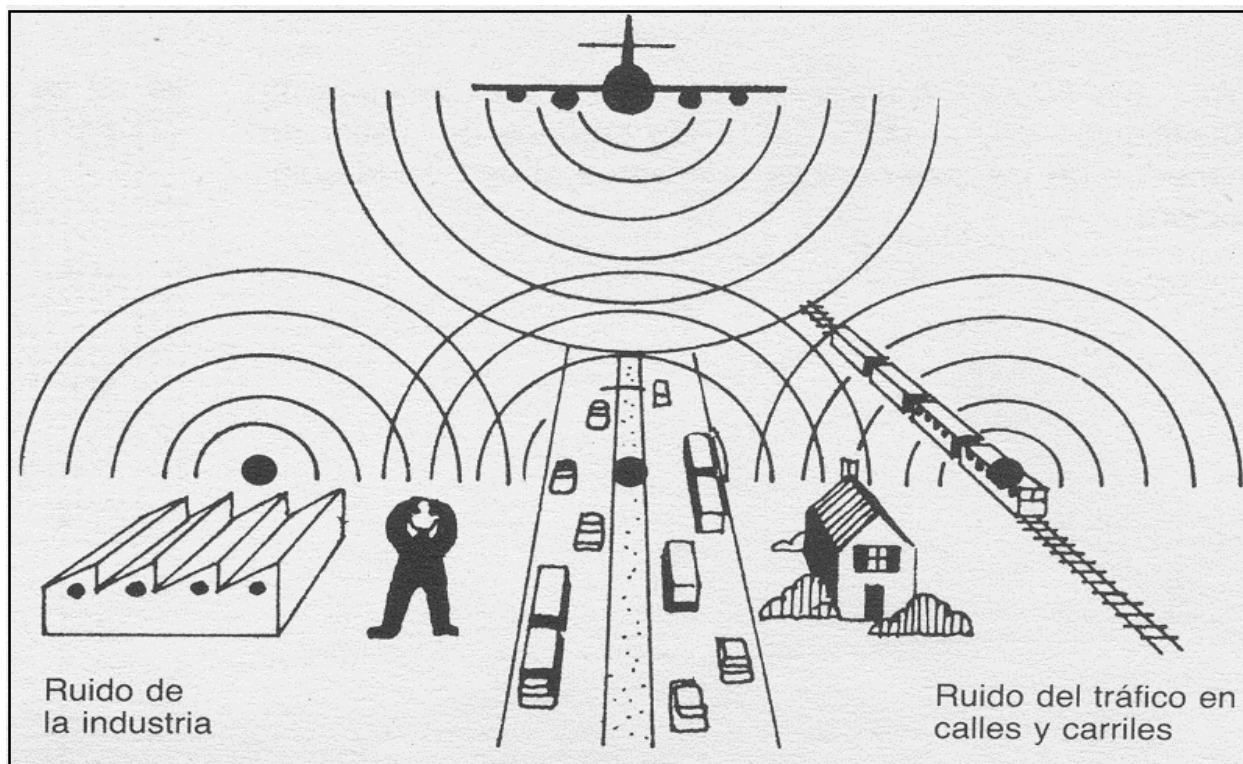


Figura 113 El ruido

Fuente: <https://www.asaicpa.es/index.php/informacion/noticias/otras-noticias/124-el-ruido-invade-nuestras-vidas>

FRECUENCIA (Hz)

Las frecuencias son fenómenos periódicos del sonido en distintas tonalidades que transcurren secuencialmente durante un tiempo. *“La frecuencia de un fenómeno periódico como una onda sonora es el número de veces que dicho fenómeno se repite por unidad de tiempo (es decir el número de ciclos por segundo. La frecuencia normalmente se designa mediante un número, seguido de una unidad, hertzio (Hz).”* (López, 1999, pág. 5) ver figura número 114.

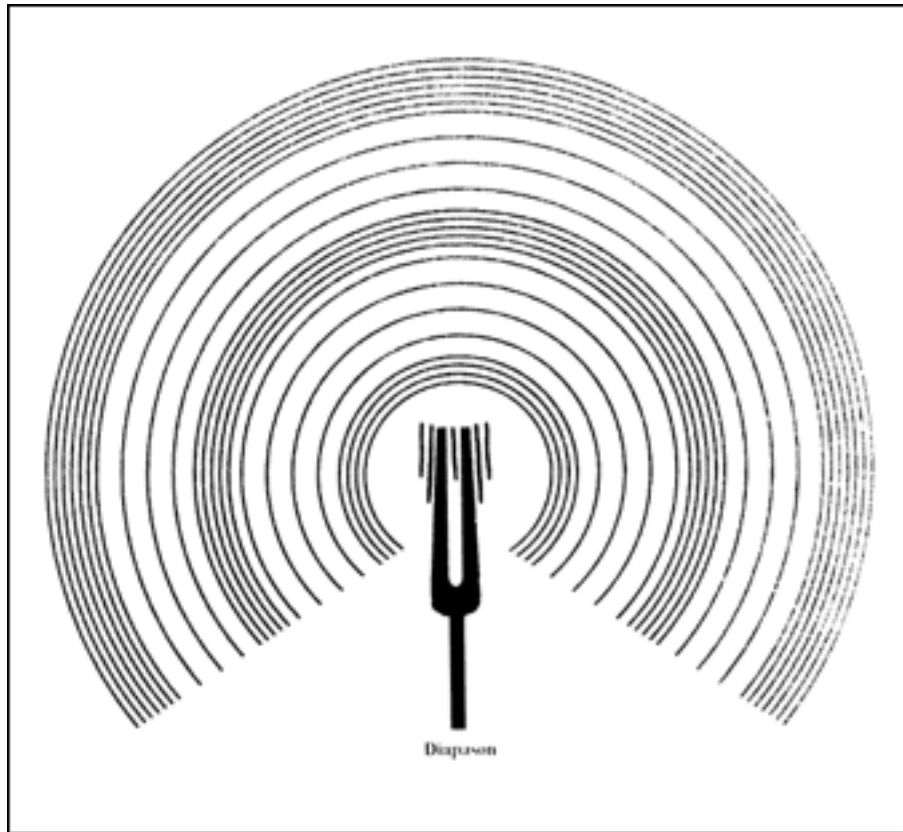


Figura 114 Frecuencia de una onda sonora

Fuente: (López, 1999, pág. 6)

Las frecuencias (Hz) auditivas que pueden ser perceptibles al oído humano se caracterizan en tres categorías:

1. **Tonos graves:** (125Hz a 250 Hz)
2. **Tonos medios:** (500Hz a 1.000 Hz)
3. **Tonos agudos:** (2.000 Hz a 4.000 Hz)

AMPLITUD (dB)

La Amplitud con la que un sonido es percibido por el oído está relacionado con la intensidad con la que una fuente emisora genera este mismo. “*Si la amplitud es grande, el sonido será fuerte, si es pequeña, el sonido será débil*”. (Graciela Roselló Vilarroig, 2002)

La unidad en la que se analiza el sonido en el ser humano es el decibel. Esta unidad nos representa variaciones logarítmicas las cuales pueden relacionarse con la forma de escucha del humano. Esta característica nos determina que tan alto o que tan bajo es un sonido escuchado. El rango de intensidades varía entre los 0 y 120dB donde el nivel 0 son sonidos inaudibles y nivel 120 se presencia como el umbral del dolor en el oído. Según la figura número 115 se puede apreciar el rango del nivel de la presión sonora adecuado para la palabra y la musica dentro de una frecuencia entre 20 a 16.000 Hz.

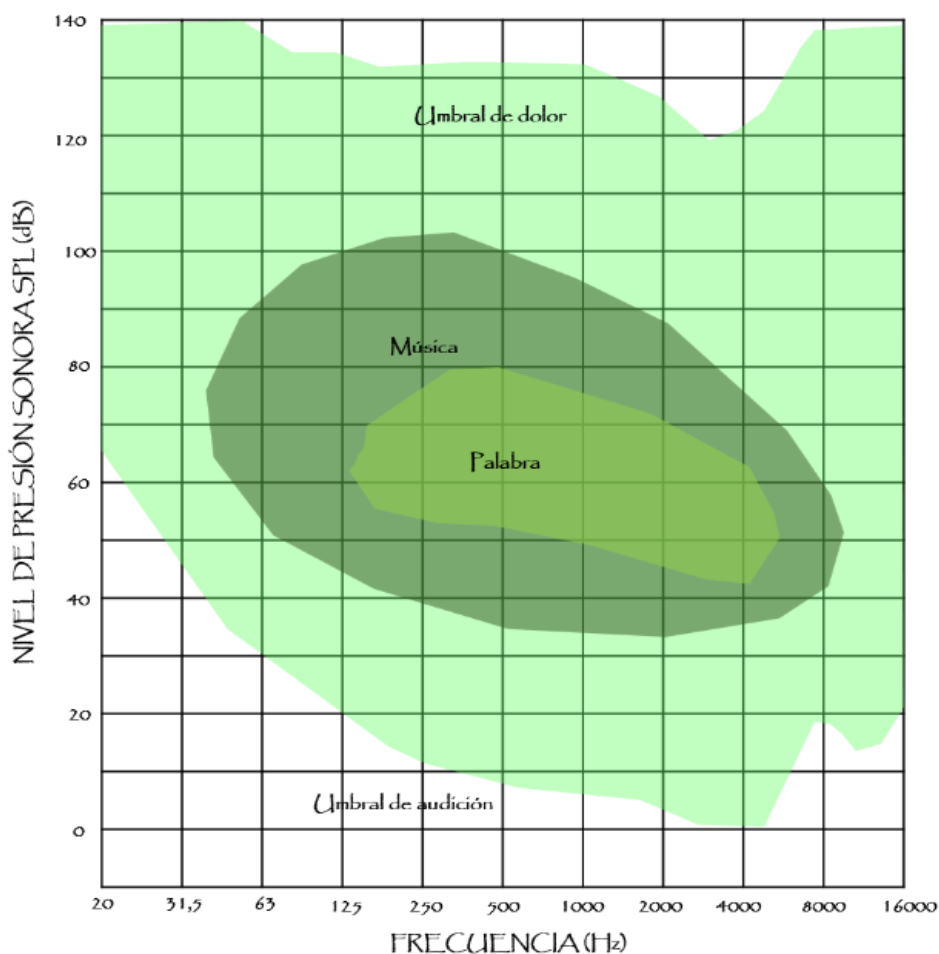


Figura 115 Niveles audibles en función de la frecuencia junto con las zonas correspondientes a la música y a la palabra

Elaboración propia. **Fuente:** (Isbert, 1998, pág. 37)

COMPORTAMIENTO DE UNA ONDA SINUSOIDAL

La duración de un sonido propagado está directamente relacionada con la longitud de onda y frecuencia. es el tiempo medido en segundos que dura una señal sonora propagándose en el medio. Ver figura número 116.

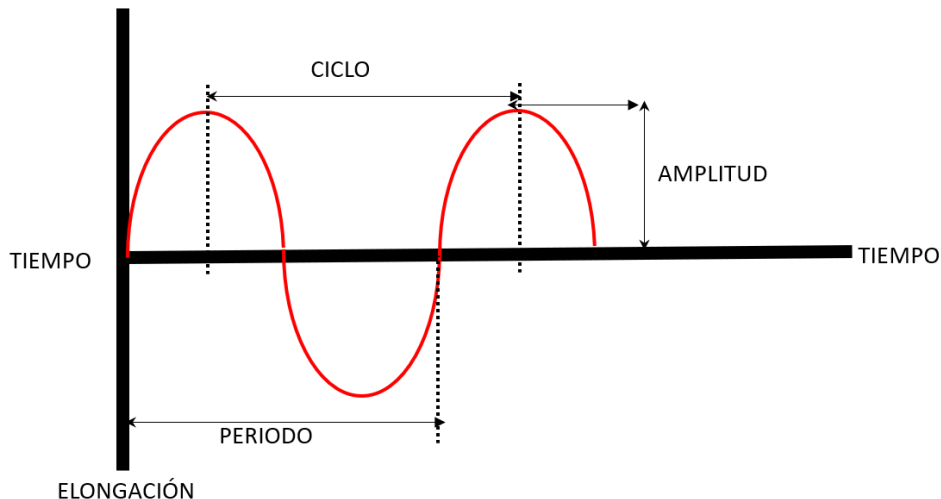


Figura 116 Periodo (segundos)

Elaboración propia. **Fuente:** (<http://rabfis15.uco.es>)

LONGITUD DE ONDA

La longitud de onda es el recorrido entre dos puntos contiguos en un mismo medio sonoro. “Es la distancia perpendicular entre dos frentes de onda que tienen la misma fase, por ejemplo entre compresiones máximas. Esta longitud es la misma distancia que viaja la onda sonora en un tiempo de un período, es decir en un ciclo completo de vibración. La longitud de onda se representa por λ , estando relacionada con la frecuencia f (Hz) y la velocidad del sonido c (m/s).” (López, 1999, pág. 17) Ver figura número 117.

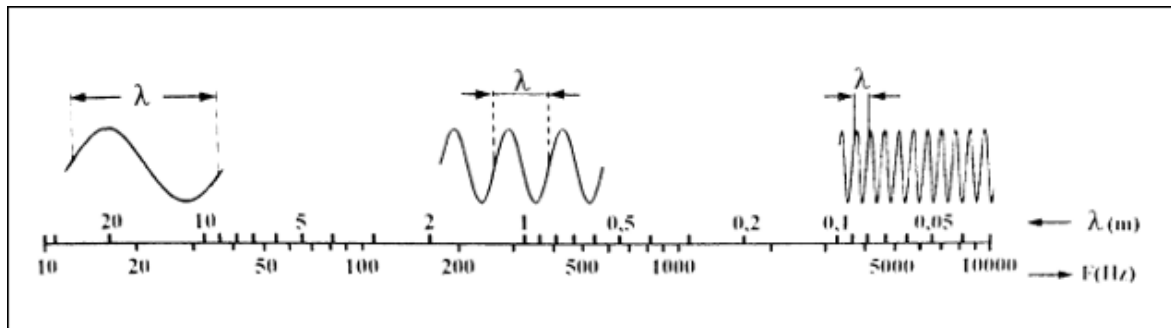


Figura 117 Relación entre la longitud de onda y la frecuencia del sonido en el aire a 20°C y presión atmosférica normal

Fuente: (López, 1999, pág. 19)

ANEXO 4 IMAGEN GENERAL DEL SOFTWARE EASE VERSIÓN 4.3

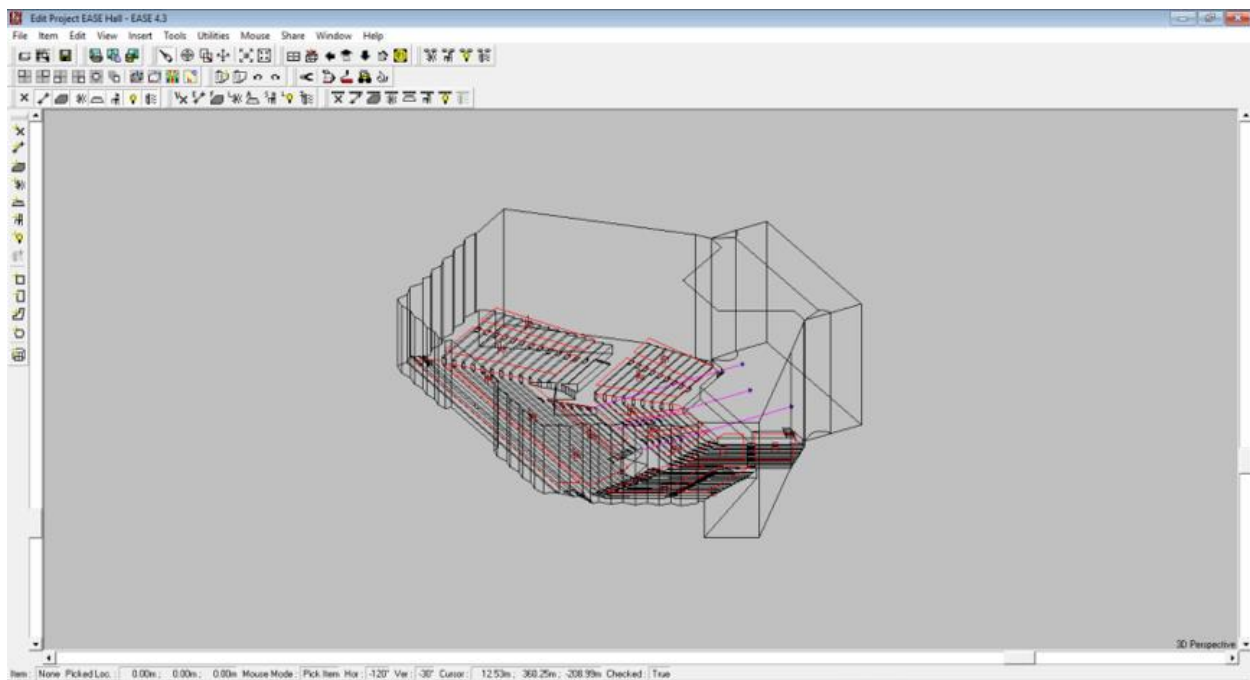
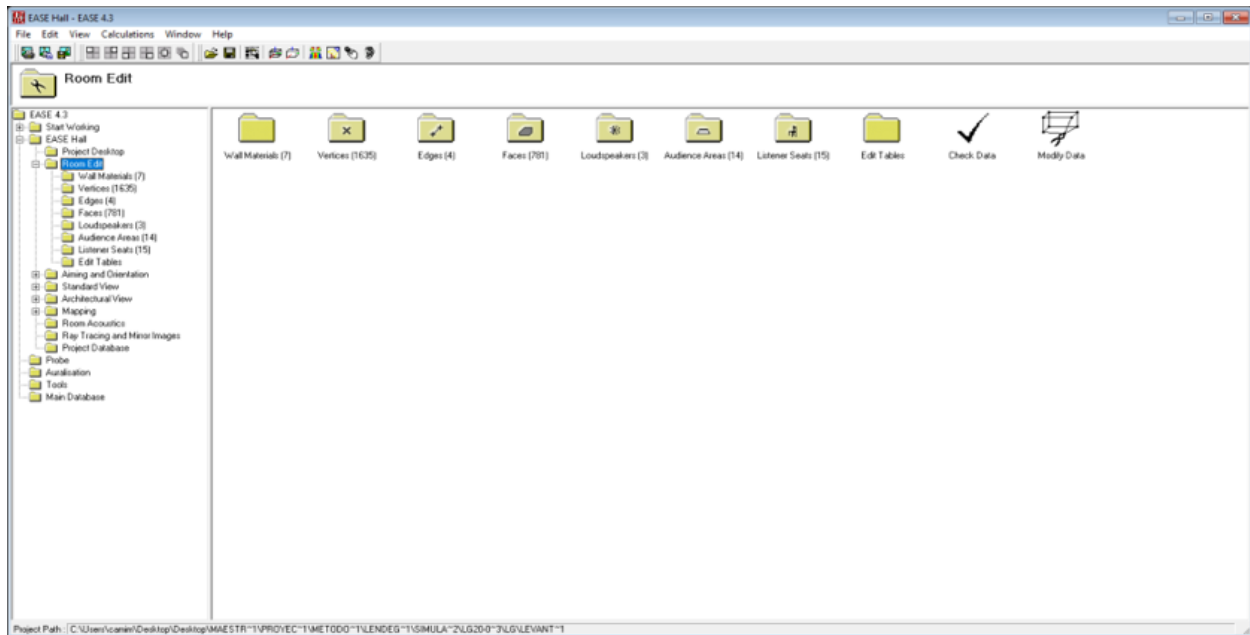


Figura 118 Software EASE versión 4.3